

Sami Hannila

**PUTKISILTOJEN SUUNNITTELUN JA MITOITUKSEN PERUS-  
TEET**

# **PUTKISILTOJEN SUUNNITTELUN JA MITOITUKSEN PERUSTEET**

Sami Hannila  
Opinnäytetyö  
Kevät 2016  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma, rakennustekniikka

---

Tekijä: Sami Hannila  
Opinnäytetyön nimi: Putkisiltojen suunnittelun ja mitoituksen perusteet  
Työn ohjaaja: Kai Kuula, DI  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2016  
Sivumäärä: 66

---

Putkisillat ovat rakenteita, joiden tehtävänä on kantaa teollisuusputkistolta, virtajohdoista sekä kaapelihyllyiltä tulevat kuormat. Teollisuuslaitoksen putkistoja kannattelevia siltarakenteita pidetään usein toisarvoisina rakenteina, minkä vuoksi usein päädytään käyttämään reilusti varmallalla puolella olevia mitoituskuormia. Rakenteiden mittasuhteiden kasvaessa kuormien tarkempi määrittäminen on kuitenkin suositeltavaa, vaikka pyrkimyksenä ei olisikaan rakenteiden optimointi. Varmalla puolella olevien kuormien käytöllä päädytään yleensä suuriin ja kalliisiin rakenteisiin.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä putkisiltojen suunnittelu- ja mitoituskäytäntöihin. Työssä selvitettiin standardien mukaiset luonnonkuormien laskentaperiaatteet, minkä pohjalta laadittiin ohjeistus rakennesuunnittelun helpottamiseksi. Työn esimerkkikohteelle määritettiin kuormitukset ja rakenteiden mitoitusta tarkasteltiin Robot Structural Analysis -laskentaohjelmistolla.

Opinnäytetyön aluksi perehdyttiin erilaisiin putkisiltoihin ja niillä kannateltaviin putkistoihin yleisellä tasolla. Kuormien laskentaan syvennyttiin standardien, ohjeiden sekä mitoitus-esimerkin perusteella. Työssä huomattiin, että erikoisrakenteiden kuormien määrittämiseksi ei ole aina saatavilla yksiselitteisiä ohjeita, minkä vuoksi niitä joudutaan myös joskus arvioimaan. Esimerkkikohtetta havainnollistettiin Tekla Structures -mallinnusohjelmalla tehdyn 3D-mallin avulla.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi Sweco Rakennetekniikka Oy:lle ohjeistus, jonka perusteella rakennesuunnittelija voi tarvittaessa määrittää putkisiltoihin kohdistuvat tuuli-, lumi- ja jääkuormat. Ohjeen perusteella suunnittelija löytää nopeasti aiheeseen liittyvää lisätietoa tämän opinnäytetyön ulkopuolelta. Lisäksi työssä luotiin laskentapohja, jota voidaan hyödyntää avonaisen ristikkorakenteen tuulikuormien laskennassa. Työ koettiin tärkeäksi, koska aiheeseen liittyvää ohjeistusta ei ollut aiemmin tehty ja käytännön suunnittelutyössä on esiintynyt tarve kuormien tarkemmalle määrittämiselle.

---

Asiasanat: putkisillat, teollisuusputkistot, lumikuorma, tuulikuorma, jääkuorma

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Construction Engineering, Structural Engineering

---

Author: Sami Hannila

Title of thesis: Basics of Designing and Analyzing Pipe Racks

Supervisor: Kai Kuula, M.Sc

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2016

Pages: 66

---

Pipe racks are structures which function is to support industrial pipelines, power cables and instrument cable trays. Because pipe racks are often considered as secondary structures, it is typical to end up using design loads to be on safe side. When the dimensions of structures are increasing, accurate determination of design loads is recommendable, even if the aim is not the optimization of structures.

The aim of this Bachelor's Thesis was to examine the basics of designing and analyzing pipe racks. In the thesis work the calculating principle of environmental loads according to the standards were examined. Instructions for the facilitation of designing pipe racks were created. The design loads were determined to an example of pipe racks and the structural analyses were illustrated by a calculation model created by Robot Structural Analysis -calculation software.

In the beginning of the thesis the focus was on various pipe rack structures and pipelines in general. The calculation of the design loads were familiarized with standards, guidelines and the calculation example. In the thesis work it was found that the determinations of special structures loads were not always available, therefore the design loads have to be estimated sometimes. The example of pipe racks were illustrated by a 3D-model that was created by Tekla Structures -modeling software.

As a result of this thesis, instructions simplifying the determination of the wind actions, snow loads and ice actions on pipe racks were compiled to be used by a structural engineer. Based on the guidelines a designer can easily find for more information outside this thesis. In this thesis work, a calculating base for wind loads was created. The thesis proved to be important, because it was found out that no previous guidance existed and it appeared that more accurate determination of the loads are needed.

---

Keywords: pipe racks, industrial pipelines, snow loads, wind actions, ice actions

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää Sweco Rakennetekniikka Oy:tä mahdollisuudesta tehdä tämän opinnäytetyön. Kiitän Jukka Jarttia, Anneli Palokangasta sekä Tuomo Tourulaa mielenkiintoisesta ja haastavasta opinnäytetyön aiheesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia henkilöitä ja tahoja, jotka ovat olleet auttamassa tämän opinnäytetyön eteenpäin viemisessä.

Haluan kiittää myös opinnäytetyöni ohjaaja, Oulun ammattikorkeakoulun mekaniikan ja lujuusopin lehtori Kai Kuulaa rakennetekniikan opetuksesta sekä asiantuntevista nevoista työhöni.

Lisäksi haluan kiittää vaimoani Jennaa, perhettäni sekä ystäviäni saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Oulussa 6. huhtikuuta 2016.

Sami Kristian Hannila

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	8
2 PUTKISILLAT	10
2.1 Teollisuusputkistot	10
2.1.1 Putkiston toiminnallinen jako	10
2.1.2 Putkiston materiaali	11
2.2 Putkisiltarakenteet	12
2.2.1 Rakennetyypit	13
2.2.2 Primäärικannattimet	16
2.2.3 Putkiston sijoittelu sillalle	20
3 PUTKISILLAN SUUNNITTELUN LÄHTÖTIEDOT	22
3.1 Määräykset ja ohjeet	22
3.2 Rakennustehtäväpiirustus	23
3.3 Putkiston rakenneanalyysi	24
4 PUTKISILLAN KUORMITUKSET	25
4.1 Kuormien yhdistely	25
4.2 Rakenneosien paino	27
4.3 Lumikuorma	27
4.3.1 Avonaisen putkisillan lumikuorma	27
4.3.2 Katetun putkisillan lumikuorma	28
4.4 Tuulikuorma	30
4.4.1 Tuulenpaineen määrittäminen	31
4.4.2 Sauvarakenteiden tuulikuormat	34
4.4.3 Teräväsärmäisen sauvan voimakerron	35
4.4.4 Suorakaiteen muotoisen sauvan voimakerron	37
4.4.5 Ristikkorakenteen voimakerron	38
4.5 Jääkuorma	41

4.6 Hyötykuormat	44
4.7 Muut kuormat	45
4.7.1 Kitkakuorma	45
4.7.2 Törmäyskuormat	46
5 ESIMERKKI PUTKISILLAN LASKENNALLISESTA TARKASTELUSTA	49
5.1 Laskentamallin luominen	51
5.2 Laskentamallin kuormitukset	52
5.2.1 Rakenteiden omat painot	52
5.2.2 Putkiston ja kaapelihyllyjen kuormat	52
5.2.3 Lumikuorma	54
5.2.4 Tuulikuorma	55
5.2.5 Hoitotason kuormat	56
5.3 Kuormien yhdistely	57
5.4 Murtorajatilan tarkastelut	57
5.5 Käyttörajatilan tarkastelut	60
6 YHTEENVETO	62
LÄHTEET	64
LIITTEET	
Liite 1 Putkisillan kuormitusohje	
Liite 2 Tuulikuorman Mathcad-laskentapohja sauvarakenteille	

# 1 JOHDANTO

Teollisuuslaitoksissa putkisillat ovat rakenteita, jotka tukevat prosessien vaatimia putkilinjoja, kaapeleita sekä niiden huoltoon tarkoitettuja hoitotasoja. Koska putkisiltojen rakentamiskustannukset ovat verrattain pieniä teollisuuslaitoksen kokonaiskustannuksiin nähden, niitä pidetään usein toisarvoisina rakenteina. Prosessien toiminnan ylläpitämisen kannalta putkisillat ovat kuitenkin erittäin merkityksellisessä roolissa, minkä vuoksi niiden suunnitteluun on syytä kiinnittää erityistä huomiota.

Siltarakenteiden riittämätön suunnittelu saattaa johtaa rakenteiden ylimitoitukseen tai monimuotoisissa siltarakenteissa merkittäviin alimitoituksiin. Putkistojen siltarakenteiden suunnittelukäytännöt poikkeavat tavallisten rakennusten ja tieliikennesiltojen suunnittelusta lainsäädännön, ohjeistuksen, rakenneratkaisuiden sekä kuormitusten osalta, mikä tekee niiden suunnittelusta haastavan ja mielenkiintoisen kokonaisuuden.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä putkisiltojen suunnittelu- ja mitoituskäytäntöihin. Työssä kootaan yhteen osa teollisuuslaitosten siltarakenteiden suunnittelu- ja mitoitusperusteista olemassa olevien ohjeiden, määräysten sekä kokemuseräisen tiedon perusteella. Rakennesuunnittelijan työn helpottamiseksi opinnäytetyön tavoitteena on myös luoda yksinkertainen ohjeistus luonnonkuormien ja niiden yhdistelmien määrittämiseksi.

Lisäksi luodaan laskentapohja sauvamaisten rakenteiden sekä ristikoiden eurokoodin mukaista tuulikuormien laskentaa varten. Rakenteellista mitoitusta havainnollistetaan esimerkkikohteeseen tehtävällä FEM-laskennalla. Aiheen laajuuden vuoksi tässä työssä perehdytään perusteellisemmin vain putkisiltojen lumi-, tuuli- ja jääkuormien määrittämiseen. Ne kuormitukset, jotka saadaan rakennesuunnittelun lähtötietoina, käsitellään suppeammin.



Työn alussa käydään läpi teollisiin putkisiltoihin liittyviä käsitteitä yleisesti. Sen jälkeen edetään vaiheittain suunnittelun lähtötietojen selvittämiseen sekä kuormien laskentaan. Työn lopuksi esimerkkitilanteeseen tehdään laskennallinen tarkastelu Robot Structural Analysis Professional 2015 -ohjelmistolla.

Insinööriyön tilaajana toiminut Sweco Rakennetekniikka Oy on Sweco-konserniin kuuluva kansainvälinen asiantuntijayritys. Nykyisin Rakennetekniikalla työskentelee lähes 700 asiantuntijaa 18 eri paikkakunnalla. Yritys tarjoaa vaativien talonrakennuksen ja teollisuusrakennuksen suunnittelun lisäksi myös korjausrakentamisen ja infrarakentamisen palveluita. Suunnittelukohteisiin kuuluvat teollisuusrakennukset sekä asuin- ja liiketilarakennukset.

## **2 PUTKISILLAT**

Teollisuusprosessien sekä niihin liittyvien putkistojen suunnittelun syvällisellä ymmärtämisellä ei ole ehdottoman suurta merkitystä putkisiltojen rakenteiden suunnittelun kannalta. Putkisillalla tuettavien putkien sijoittelun ja kannatuksen perusteiden ymmärtäminen luo kuitenkin hyvän pohjan putkisiltojen suunnittelukokonaisuuden ymmärtämiseksi. Putkisiltojen rakenteiden suunnittelun kannalta on tärkeää ymmärtää niiden erityispiirteet verrattuna tavallisiin rakennuksiin ja rakennelmiin (Kesti 1992, 108–109). Luvuissa 2.1 – 2.2 esitetään tärkeimmät perustiedot putkisiltarakenteista sekä niihin liittyvistä putkistoista.

### **2.1 Teollisuusputkistot**

Teollisuusputkistot muodostavat yhdessä varastotilojen ja tuotantoyksiköiden kanssa kokonaisen prosessilaitoksen. Prosessilaitoksella tarkoitetaan teollisuuden tuotantolaitosta, jossa sen käyttämien raaka-aineiden ominaisuuksia muutetaan käsittelyllä siten, että lopputuotteen ominaisuudet poikkeavat merkittävästi raaka-aineiden ominaisuuksista. Tässä prosessilaitoksen kokonaisuudessa putkistot ovat merkittävässä osassa prosessien toimintaa ja niiden tehtävänä on toimia virtausaineiden kuljettajina prosessiin kuuluvien laitteiden, varastojen sekä tuotantotilojen välillä. Teollisuusputkiston oikeanlainen käyttö ja toiminta luovat perustan suurten teollisuuslaitosten kannattavalle toiminnalle. (Kesti 1992, 8–12.)

#### **2.1.1 Putkiston toiminnallinen jako**

Putkistoja käytetään teollisuuslaitoksesta riippuen hyvin monenlaisissa olosuhteissa ja käyttökohteissa. Putkistoissa virtaavat lukuisat eri aineet, jotka poikkeavat olomuodoiltaan merkittävästi toisistaan. Jossakin putkessa vallitsee korkea paine, toisessa taas korkea lämpötila. Myös ympäristöolosuhteet luovat putkiston säilyvyydelle omat haasteensa. (Kesti 1992, 8–11.)

Prosessissa käytetyllä virtaavalla aineella on suuri merkitys putkistolta vaadittaviin ominaisuuksiin sekä niiden materiaalivalintaan. Teollisuusputkistot voidaan jakaa toiminnallisuuden perusteella seuraaviin ryhmiin:

1. teollisuusrakennusten lämmitys- ja ilmastointiputkistot
2. pneumaattiset ja hydrauliset materiaalin siirtolinjat
3. vaarallisten aineiden putkistot
4. ydinvoimalaitoksen putkistot
5. korkean lämpötilan putkistot
6. kunnallistekniset putkistot
7. kylmätekniset putkistot
8. hydraulikkaputkistot
9. suspensioputkistot
10. vesihöyryputkistot
11. kaasuputkistot.

Näiden ryhmien erityispiirteitä ja materiaalirajoitteita käsitellään Teollisuusputkistot (1992) -oppikirjassa (Kesti 1992, 8-11).

### **2.1.2 Putkiston materiaali**

Putkiston rakenneaineen valinnan perustana pidetään toimintavarmuuden ja turvallisuuden ohella myös taloudellisuutta. Virtaavien aineiden putkistoon aiheuttamat rasitukset sekä vallitsevat ympäristöolosuhteet poikkeavat merkittävästi keskenään, minkä vuoksi putkilta vaadittavat ominaisuudet ovat yksilöllisiä. Putkimateriaali valitaan prosessikohtaisesti siten, että se kestää siihen kohdistuvat mekaaniset, fysikaaliset ja kemialliset rasitukset. Lisäksi putken rakenneaineen tulee kestää ympäristön aiheuttamat rasitukset kaikissa niissä olosuhteissa, joihin putkisto joutuu käytön aikana. (Kesti 1992, 45.)

Teollisuusputkien materiaalina voidaan käyttää useita eri metallilaatuja tai metalliseoksia. Metalliputkien ohella myös muoviputkia voidaan käyttää. Muoviputkia käytetään niiden keveyden, hyvän kemiallisen kestävyuden, helpon käsiteltävyyden sekä edullisen hintansa vuoksi. Muoviputkien käyttöä kuitenkin rajoittavat

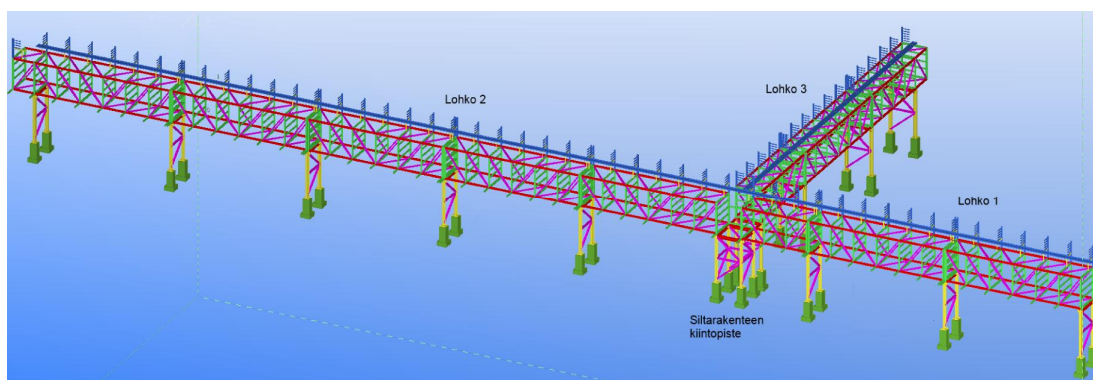
muun muassa niiden korkeiden lämpötilojen ja paineen kestävyys. (Kesti 1992, 59.)

Putkistossa käytetyn materiaalin valinta vaikuttaa niille sallittaviin taipumiin. Muoviputkille sallitaan tyypillisesti suuremmat taipumat kuin teräsputkille. Muoviputkiston kannatusvälit ovat teräsputkistoon nähden lyhemmät, koska muovin kimmokerroin on vain murto-osa teräksen kimmokertoimesta. Putkistossa käytetyn materiaalin materiaaliominaisuudet vaikuttavat viime kädessä myös niiden kantukseen ja edelleen putkisilloilla vaikuttaviin rasituksiin. (PSK 7304. 2014, 2.)

## 2.2 Putkisiltarakenteet

Teollisuuslaitosten ja voimalaitosten putkisillat ovat rakenteita, joita käytetään prosessien vaatimien putkien ja niihin liittyvien osien, virtajohtojen sekä kaapelihyllyjen kannattelemiseen. Putkisilloilla voidaan myös tukea mekaanisia laitteita, kuten pumppuja tai kuljettimia. Putkistojen sekä niihin liittyvien laitteiden ja venttiilien tarkkailua ja huoltamista varten siltarakenteen yhteyteen suunnitellaan yleensä myös hoitotaso. (Drake – Walter 2010, 241.)

Putkisilta muodostaa kokonaisuuden, joka koostuu peräkkäisistä siltalohkoista. Siltarakenteeseen valitaan kiintopiste, joka jäykistetään siten, että sillan liike kyseisen pisteen suhteen estyy. Muiden siltalohkojen sallitaan siirtyä pituussuunnassa lämpötilan ja vaakavoimien vaikutuksesta. Tällä tavoin pitkien siltarakenteiden liikkeitä voidaan ohjata haluttuihin suuntiin (Bendapudi 2010, 6-8). Kuvassa 1 esitetään kolmilohkoinen putkisilta sekä siltarakenteen kiintopiste.



KUVA 1. Putkisillan lohkojako ja kiintopiste (Ristikkorakenteinen putkisilta 2016)

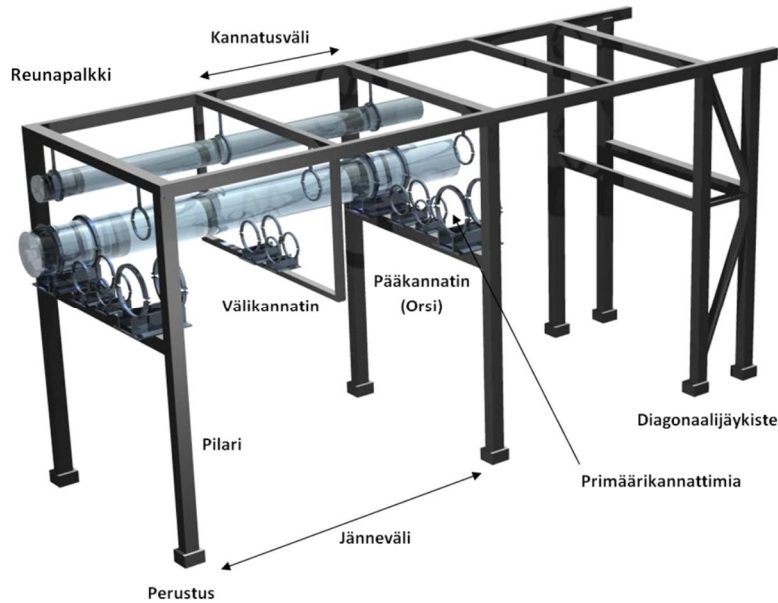
### **2.2.1 Rakennetyypit**

Tuettavien putkien lukumäärä ja laatu, kustannukset, maaperä sekä käytettävä tila vaikuttavat oleellisesti putkisillan rakennetyypin valintaan. Yksinkertaisimmillaan putkisiltana voi toimia pelkkä palkkirakenne, jonka päältä putkistoa kannatellaan primäärikannattimilla. Putkien määrän ja kuorman kasvaessa joudutaan kuitenkin käyttämään kantokyvyltään suurempia rakennetyyppejä. Tällöin siltarakenteina tulevat kysymykseen erilaiset pilarit, palkit, kehät tai ristikkorakenteet. Juuri oikean rakenteen valinta ja optimointi on hyvin vaikea tehtävä, sillä teollisuudessa rakenteiden kuormitustilanteet ja käyttötarkoitukset saattavat muuttua hyvinkin nopealla aikavälillä. (Kesti 1991, 7-8.)

Putkisillan rakennetyypin valintaan vaikuttavat kuormitusten lisäksi myöskin rakenteen mittasuhteet. Esimerkiksi yli 12 metrin jännevälillä ristikkorakenne soveltuu parhaiten, kun taas vastaavasti lyhemmillä jänneväleillä palkkirakenteinen putkisilta on yleensä kustannustehokkaampi vaihtoehto. (Kesti 1991, 7.)

#### **Palkkirakenne**

Putkisiltarakenteena voidaan käyttää palkkirakenteita, joissa ainakin yhden osan katsotaan kestävän siihen kohdistuvat leikkaus- ja taivutusrasitukset. Palkkien materiaalina käytetään yleensä terästä. Aiemmin putkisilloissa on käytetty myös teräsbetonista valmistettuja palkkeja sekä pilareita, mutta niiden käyttö on vähentynyt terästeollisuuden kehityksen myötä (Kesti 1991, 6). Sivulla 14 kuvassa 2 esitetään palkkirakenteisen putkisillan rakenne ja sen osat.



KUVA 2. Palkkirakenteisen putkisillan osat (Jaakkosela 2013, 7)

Palkkirakenteiset putkisillat ovat tyypillisesti jäykkiä kehiä, jotka on yhdistetty toisiinsa pitkittäissuuntaisilla reunapalkkeilla. Jäykkien nurkkien lisäksi pilarin ja perustusten liitokset toteutetaan yleensä jäykällä liitoksella. Liitokset voidaan kuitenkin toteuttaa myös nivelellisenä, jos sillalla kannateltava putkisto sallii rakenteelle suuremmat vaakasiirtymät. Putkisillan pitkittäissuuntaisten vaakasiirtymien rajoittamiseksi kehävälejä joudutaan sitomaan diagonaalijäykisteillä. (Drake – Walter 2010, 241.)

Palkkirakenteisessa sillassa putkiston kuormitukset siirtyvät pääkannattimen välityksellä suoraan pilareille. Orsirakenteet voidaan kiinnittää pilareihin joko nivelellisellä tai jäykällä liitoksella. Nivelliitoksessa orsirakenteen pystykuormat välittyvät pilarille leikkausvoiman välityksellä. Vastaavasti jäykässä liitoksessa orsirakenteen kuormat siirtyvät pilarille leikkausvoiman lisäksi myös kiinnitysmomentin välityksellä.

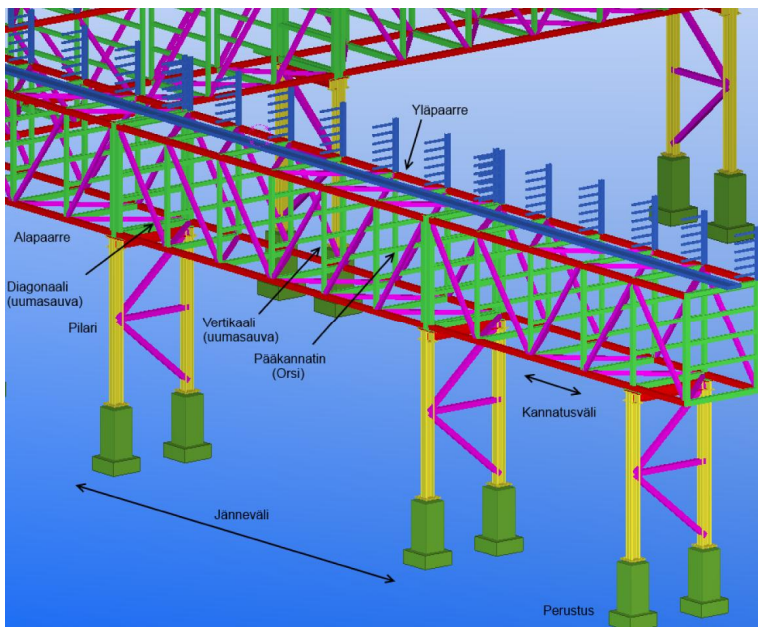
Putkiston painon välikannattimelle aiheuttamat kuormitukset siirtyvät pilareille reunapalkkien välityksellä. Siltarakenteen yläpinnan tasossa vaikuttavat, pitkittäissuuntaiset, vaakakuormat siirretään reunapalkkien välityksellä diagonaalijäy-

kisteille, joista kuormat välittyvät edelleen perustuksille. Jos poikittaiset kehät eivät liity toisiinsa reunapalkeilla, toimivat pilarit tällöin sillan pitkittäissuunnassa ulokkeellisina jäykisteinä. Tällöin vaakakuorman vaikutukset siirretään perustuksille pilarin alapään liitoksen välityksellä.

## Ristikkorakenne

Putkisillan kuormien tai jännevälin kasvaessa tarvitaan kantokyvyltään suurempia ja tehokkaampia rakenteita. Tällöin palkkirakenteen sijasta voidaan käyttää ristikkorakenteista putkisiltaa. (Kesti 1991, 7.)

Ristikkorakenteisen putkisillan uumasauvojen ja paarteiden liitoksia voidaan pitää yleensä kitkattomina nivelinä. Ristikon uumasauvat ovat rakenneosia, jotka mitoitetaan kestäämään ainoastaan veto- tai puristusrasituksia. Ristikon paarteet suunnitellaan jatkuvina, jolloin niissä vaikuttaa normaalivoimien lisäksi myös taivutusrasitus. Ristikolle, jonka kaikki sauvat ovat samassa tasossa, käytetään nimitystä tasoristikko. Nykyaikaisissa laskentaohjelmissa siltarakenteita käsitellään usein avaruusristikoina (SFS-EN 1993-1-8. 2005, 56). Ristikkorakenteisen putkisillan rakenteeseen liittyviä käsitteitä havainnollistetaan kuvassa 3.



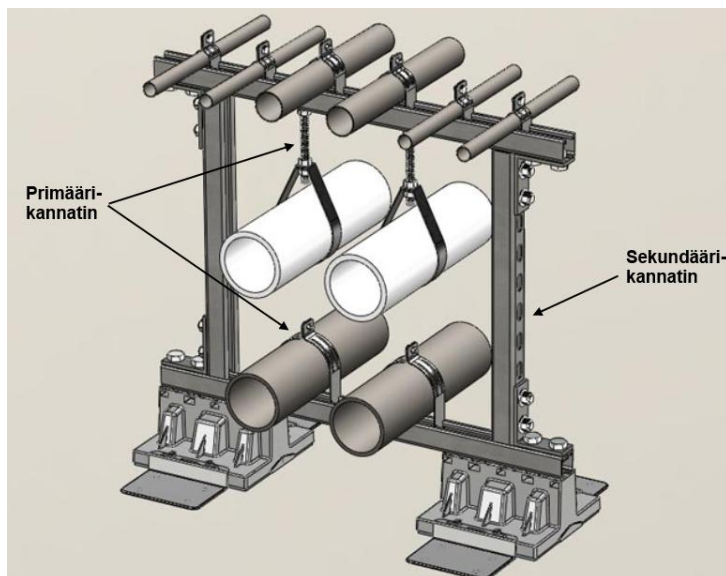
KUVA 3. Ristikkorakenteisen putkisillan osat (Ristikkorakenteinen putkisilta 2016)

Ristikkorakenteinen putkisillan osa muodostuu tyypillisesti kahdesta ristikosta ja niiden väliin sijoitetuista orsirakenteista. Tällöin ristikoiden vertikaalisauvat ja putkiston orsirakenteen muodostavat jäykkiä kehiä. Ristikkojen ylä- ja alapaarteiden tasot jäykistetään tuulisiteillä, jolloin rakenne toimii ristikkona sekä pysty että vaakasuuntaisille kuormille.

Putkiston kannattimet siirtävät niihin kohdistuvat kuormitukset ristikoille orren ja vertikaalisauvan liitoksen välityksellä. Tällöin kuormat siirtyvät pilarirakenteille ristikon sauvoissa vaikuttavien normaalivoimien välityksellä. Vastaavalla tavalla putkisillan ylä- ja alapaarteiden välissä olevat tuulisiteet siirtävät tuulesta ja putkistolta tulevat vaakakuormitukset pilarirakenteille, joista rasitukset välittyvät edelleen perustuksille.

### 2.2.2 Primäärikannattimet

Kannakointi muodostuu putkistoihin välittömästi liittyvistä primäärikannattimista sekä sekundäärikannattimista. Putkisillasta käytetään putkistosuunnittelun yhteydessä nimitystä sekundäärikannatin. Primäärikannattimet ovat tukirakenteita, joilla putkisto kiinnitetään putkisillan orsirakenteisiin (Kesti 1992, 108). Kuvassa 4 havainnollistetaan putkiston kannakointiin liittyviä käsitteitä.



KUVA 4. Putkisilta ja putkistoon välittömästi liittyvät tukirakenteet (Kannakointi)



Putkiston kannakoinnin suunnittelussa otetaan huomioon lämpölaajenemisesta aiheutuneet kuormitukset. Tällöin varmistutaan, että putkiston ja siltarakenteen lämpöliikkeet tapahtuvat hallitusti. Lämpötilaeron aiheuttamilta kuormituksilta ei voida kuitenkaan täysin välttyä, koska lämpötilaero aiheuttaa aina siltarakenteeseen ja putkistoon eri verran liikettä. Suhteellisen lämpöliikkeen vuoksi putkisto liikuu siltarakenteen suhteen, jolloin niiden välille muodostuu reaktiovoimia. Putkiston kiinteillä tuilla putkisto ei pääse liukumaan, jolloin niihin syntyy joko kiinnitys- tai ohjausvoimia, riippuen kannakkeen vapausasteista. (Kesti 1992, 121.)

Kannaketyypillä on suuri vaikutus putkistolta siltarakenteille välittyviin kuormiin, sillä erityyppiset kannakkeet mahdollistavat putkien erilaiset liikkeet siltarakenteen suhteen. Primääräkannattimien ensisijaisena tehtävänä on vastaanottaa putkistolta tulevat kuormitukset. Lisäksi kannakoinnin tehtävänä on ohjata ja rajoittaa putkiston lämpöliikettä, suojata siihen liittyviä arkoja laitteita, estää putkiston heilahduksia sekä vaimentaa niiden värähtelyä. (Kesti 1992, 108.)

### **Kiintopistekannake**

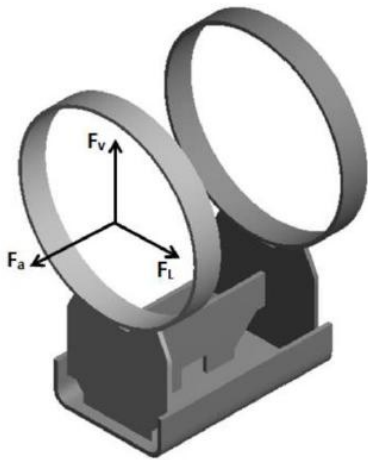
Kuvassa 5 esitettävä kiintopistekannaketta voidaan pitää putkiston tuennan kannalta tärkeimpänä kannaketyypinä. Sen tehtävänä on vastaanottaa putkiston lämpölaajenemisesta sekä paine-iskuista aiheutuneet voimat tukeutumiskohtaansa nähden kaikissa kolmessa tarkasteltavassa suunnassa. Kiintopistekannakkeella voidaan varmistaa, että putki pääsee liukumaan ja laajenemaan ainoastaan haluttuun suuntaan. (Joronen 2012, 8.)



*KUVA 5. Kiintopistekannake (Kiintopistekannake)*

## Liukukannake

Kuvassa 6 esitettävä liukukannake on putkisilloilla yleisimmin käytettävä kannaketyyppi. Sitä käytetään putken oman painon kannattamisen lisäksi myös poikittaissuuntaisten liikkeiden estämiseen. Putken pituussuunnassa esiintyvä liike tapahtuu vapaasti. Liukukannaketta käytetään yleensä ainoastaan vaakaputkien tukemiseen. Liukukannakkeessa tapahtuva lämpöliike ja sen suunta on arvioitava huolellisesti, jotta liukutuki ei pääse siirtymään pois alapuolisen tukirakenteen päältä. (Joronen 2012, 9.)



KUVA 6. Liukukannake (Liukukannake 2015)

## Riippukannake

Sivun 19 kuvassa 7 esitettävää riippukannaketta käytetään vaakaputkien tukemiseen. Putkisangasta, silmukkalevystä sekä ripustustangosta muodostuva riippukannake on kannaketyyppi, jolla voidaan säätää putken korkeus halutulle tasolle. Riippukannaketta käytettäessä varmistetaan, että putki ei pääse nousemaan lämpöliikkeen seurauksena ylöspäin. Muuten kannake ei enää tue putkea halutulla tavalla, jolloin sen todellinen kannakeväli ja jännitystaso kasvavat. Tavalliset riippukannakkeet eivät sovellu käytettäväksi dynaamisesti kuormitettujen putkis- tojen tukemiseen, koska niissä putket pääsevät heilumaan vapaasti, minkä seurauksena putket voivat vaurioitua. (Joronen 2012, 10.)



*KUVA 7. Riippukannake (Riippukannake 2012)*

### **Ohjauspistekannake**

Ohjauspistekannake on yleisin putkiston lämpöliikkeiden hallintaan käytettävä kannaketyyppi. Ohjauspistekannake mahdollistaa putkiston liukumisen vain ennalta valittuihin suuntiin. Tavallinen ohjauspistekannake sallii pituussuuntaiset liikkeet, mutta estää ne putken toisessa tai molemmissa poikittaissuunnissa. (Joronen 2012, 11.)

### **Jousikannake**

Jousikannakkeita käytetään tilanteissa, joissa putkelle tarvitaan kannake tukemaan putken omaa painoa, mutta lämpöliike aiheuttaa kannakepisteeseen pysyvuuntaista liikettä. Tällöin liuku- tai riippukannaketta ei voida käyttää. Tavallisen jousikannakkeen toimita-alue on kuitenkin niin pieni, että sen pienikin puristuma muuttaa voimaa, jolla putkea kannatetaan. Jousi voidaan kiristää etukäteen kohdistamaan kannakepisteeseen joko asennustilanteen tai käyttötilanteen kuormaa vastaava voima. Tavallisen jousikannakkeen hyvänä puolena voidaan pitää sitä, että se toimii jollakin tavalla myös väärin mitoitetuna. (Joronen 2012, 12.)

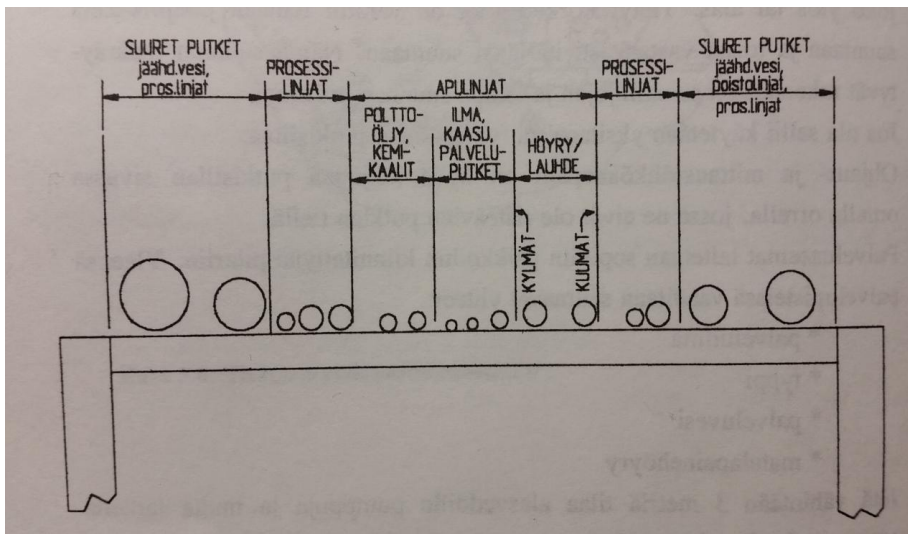
### **Vaimennin**

Vaimentimena käytetään yleensä viskoosia nestevaimenninta. Vaimennin sallii vapaasti putkiston hitaat liikkeet, mutta vastustaa kaikkia nopeita dynaamisia liikkeitä. (Joronen 2012, 13.)

### 2.2.3 Putkiston sijoittelu sillalle

Pienin putkisillan orsirakenteen päälle asennettava putkikoko on DN25. Sitä pienemmät putket voidaan kannatella suuremmista putkista tai ne voidaan asentaa esimerkiksi kaapelihyllylle. Edellä mainittua pienempien putkien paino kuitenkin huomioidaan kaapelihyllyllä tai suuremman putken painossa. Orsirakenteiden tai vutusrasitusten vähentämiseksi suuret putkilinjat pyritään sijoittamaan mahdollisimman lähelle pilareita ja mahdollisimman alas, jotta putkistolta tulevien vaakuormien vaikutukset perustuksille saadaan minimoitua. Putkia ei voida kuitenkaan asentaa suoraa pilarien kohdille, sillä tällöin putkisillan myöhempi laajentaminen ei ole mahdollista. (Kesti 1992, 38.)

Putkisillan keskelle asennetaan pienemmät putket (apulinjat) sekä prosessiputkistot, joista joudutaan ottamaan liittymiä molemmille puolille putkisiltaa. Muussa tapauksessa prosessiputket sijoitetaan sille puolelle siltaa, että niihin tehtävät liittymät ovat mahdollisimman lyhyet. (Kesti 1992, 38). Kuvassa 8 havainnollistetaan putkien sijoittelua siltarakenteelle.



KUVA 8. Teollisuusputkien sijoittelu siltarakenteelle (Kesti 1992, 38)

Putkiston kannakeväli määräytyy putken materiaalin, seinämävahvuuden, halkaisijan, lämpötilan, eristyksen sekä kuljetettavan aineen mukaan. Sopivan kannake-

kevÄlin suuruuteen vaikuttaa merkittÄvÄsti myÖs putken kannatustapa. Standardissa PSK 7304 on taulukoitu eri olosuhteissa olevien teollisuusputkien suositeltavia kannatusvÄlejä (PSK 7304. 2014, 3). Taulukossa 1 esitetÄÄn kaasua tai nestettä sisÄltÄvien eristÄmättömien terÄsputkien kannatusvÄlit 20 °C:n lÄmpÖtilassa.

*TAULUKKO 1. Kaasua tai nestettä sisÄltÄvien eristÄmättömien terÄsputkien kannatusvÄlit lÄmpÖtilassa 20 °C (PSK 7304. 2014, 3)*

Putki Pipe		SisÄltö Medium			
		Kaasu t = 20 °C Gas t = 20 °C		Neste t = 20 °C Liquid t = 20 °C	
	UlkoHalkaisija x seinÄmÄnpaksuus Outside diameter x wall thickness	Kannatustapa Support way		Kannatustapa Support way	
		Vapaa tuenta Both ends pinned	KiinteÄ tuenta Both ends clamped	Vapaa tuenta Both ends pinned	KiinteÄ tuenta Both ends clamped
DN	d <sub>e</sub> x s mm	L m	L m	L m	L m
10	17,2 x 1,8	2,1	3,1	2,0	3,0
15	21,3 x 2	2,3	3,5	2,2	3,3
20	26,9 x 2	2,6	3,9	2,5	3,7
25	33,7 x 2	3,0	4,4	2,7	4,1
32	42,4 x 2,3	3,3	5,0	3,0	4,5
40	48,3 x 2,3	3,6	5,4	3,2	4,8
50	60,3 x 2,3	4,8	7,1	4,2	6,2
65	76,1 x 2,6	5,4	8,0	4,6	6,9
80	88,9 x 2,9	5,8	8,7	5,0	7,4
100	114,3 x 3,2	6,6	9,9	5,5	8,3
125	139,7 x 3,6	7,3	10,9	6,0	9,0
150	168,3 x 4	8,0	12,0	6,6	9,8
200	219,1 x 4,5	9,2	13,7	7,3	11,0
250	273 x 5	10,3	15,4	8,1	12,0
300	323,9 x 5,6	11,2	16,7	8,7	13,0
350	355,6 x 5,6	11,7	17,6	9,0	13,4
400	406,4 x 6,3	12,5	18,7	9,4	14,1
450	457 x 6,3	13,4	19,9	10,0	14,9
500	508 x 6,3	14,0	21,0	10,3	15,4
600	610 x 6,3	15,4	23,0	10,9	16,3
700	711 x 7,1	16,6	24,9	11,7	17,5
800	813 x 8	17,8	26,6	12,5	18,7
900	914 x 10	18,9	28,2	13,5	20,2
1000	1016 x 10	19,9	29,8	13,9	20,9
1200	1200 x 12,5	21,8	32,6	15,4	23,0

### 3 PUTKISILLAN SUUNNITTELUN LÄHTÖTIEDOT

Putkisiltojen suunnittelun lähtötiedot koostuvat lukuisista eri aineistoista. Luvuissa 3.1 – 3.3 esitetään lähtötietoaineistot, joita käytetään putkisiltojen suunnittelun esitietona. Lisäksi käydään läpi aineistot, joihin rakennesuunnittelussa käytettävät ratkaisut perustetaan.

#### 3.1 Määräykset ja ohjeet

Putkisiltojen rakennesuunnittelun valintojen ja ratkaisuiden lähtökohtana käytetään rakennuslainsäädäntöä, standardeja, viranomaisohjeistuksia ja normeja. Teräsrakenteisten putkisiltojen suunnittelu tehdään Eurokoodien 1 ja 3 mukaan. Putkisiltojen kuormat määritetään pääosin Eurokoodi 1:n mukaan ja rakenteellinen suunnittelu tehdään Eurokoodi 3:n mukaan. Kuormien määrittämisen osalta niiden käyttö ei kuitenkaan sovellu täysin aukottomasti erikoisrakenteisiin lukeutuvien putkisiltojen suunnitteluun, sillä niissä käytettävät kuormien määrittäytävät koskevat tavanomaisia rakennuksia ja rakennelmia.

Putkisiltojen suunnittelua koskevia standardeja ovat

- SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet
- SFS-EN 1991-1-1 Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat
- SFS-EN 1991-1-3 Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumi-kuormat
- SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat
- SFS-EN 1991-1-7 Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat
- SFS-EN 1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
- SFS-EN 1993-1-3 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille

- SFS-EN 1993-1-5 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet
- SFS-EN 1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoit-  
tus
- SFS-EN 1993-3-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 3-1: Mastot ja pii-  
put. Mastot
- SFS-EN ISO 14122-2. Koneiden kiinteät kulkutiet. Osa 2: Työskentelyta-  
sot ja kulkutiet
- ISO 12494:2001. Atmospheric icing of structures.

### **3.2 Rakennustehtäväpiirustus**

Rakennustehtäväpiirustusta käytetään suunniteltavan rakennuskohteen tärkeim-  
pänä lähtötietona. Se on mitoitettu piirustus, jossa esitetään tarvittavat tiedot ra-  
kennuksen ja rakennusyksityiskohtien suunnittelusta ja toteutuksesta. (SFS  
4965. 1993, 1.)

Standardin SFS 4965 mukaan rakennustehtäväpiirustuksessa esitettäviä esitie-  
toja ovat

- perustusten korkeusasemat, päämitat ja sijainti
- rakenteisiin kohdistuvat putkistojen, koneiden ja laitteiden kuormat
- kiintopisteet
- tasokuormat
- rakennuskohteessa käytettävä korkojärjestelmä
- taso- ja kanaalikaltevuudet
- laiteasennusten aiheuttamat kuormat
- kiinnityslevyt
- laitteiden ja putkistojen ympäristöstä poikkeavat lämpötilat
- hoitotasot ja kulkutiet.

### 3.3 Putkiston rakenneanalyysi

Putkiston rakenneanalyysi on elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä, missä tarkastelun kohteena ovat 3-ulotteiset palkkielementit. Näiden palkkielementtien molemmissa päissä on solmupisteet ja niissä 3 siirtymä- ja 3 kiertymävapausastetta. Rakenneanalyysissä tarkastellaan putkistoa paineen lisäksi oman painon, muiden pysyvien kuormien, luonnonkuormien sekä lämpölaajenemisen vaikutuksen alaisena. Analyysin tuloksena saadaan siirtymät, kannakevoimat ja laitteiden yhdekuormat sekä putkiston eri kohdissa sisäisesti vaikuttavat voimat ja jännitystilat. (Putkiston jännitysanalyysi. 2005, 6.)

Putkistosuunnittelijan tekemästä analyysistä saadut tukireaktiot eivät kuitenkaan vastaa täysin todelliseen rakenteeseen muodostuvia tukireaktioita, sillä analyysin tulokset perustuvat laskennalliseen oletukseen, että putkikannakkeet ja putkisilta ovat täysin jäykkiä. Analyysistä saatavat tukireaktioiden arvot ovat kuitenkin turvallisella puolella, joten niitä voidaan käyttää putkisillan rakenteiden mitoituksessa. Joissakin tapauksissa kuitenkin ajaudutaan ongelmiin perustusten tai siltarakeiden mitoituksessa, jos voimaa pienentäviä tekijöitä ei oteta huomioon. (Jaakkosela 2013, 60–61.)



## 4 PUTKISILLAN KUORMITUKSET

Teollisuusputkistoa kannattelevissa siltarakenteissa vaikuttavat kuormat koostuvat lukuisista pysty- ja vaakakuormista. Kuormitukset syntyvät kannateltavien putkistojen, johtojen sekä siltarakenteen omasta painosta, putkiston ja siltarakenteen suhteellisesta lämpöliikkeestä, putkistotulevista pysty- ja vaakavoimista sekä ulkoisista voimista. Putkisillan kuormien määrittämistavat poikkeavat tavanomaisten rakennusten kuormien määrittäytavasta niiden geometrinen erityispiirteiden vuoksi (Drake – Walter 2010, 242–244). Luvussa 4.1 esitetään putkisilltojen kuormitusyhdistelmien määrittämisperiaatteet eri tilanteissa. Luvuissa 4.2 – 4.7 esitetään putkisilloissa tyypillisimmin vaikuttavat mekaaniset kuormat.

### 4.1 Kuormien yhdistely

Putkisillan rakenteet mitoitetaan eurokoodin mukaisille kuormitusyhdistelmille. Näistä yhdistelmistä haetaan määräävät tapaukset murto- ja käyttörajatilan sekä onnettomuustilanteen tarkasteluja varten (RIL 201-1-2011. 2011, 19). Kuormitustapauksia muodostuu yleensä lukuisia, sillä putkisilloissa vaikuttavia kuormituksia on useita ja osalla kuormituksista voi olla myös eri vaikutussuunta kuormitustilanteesta riippuen.

Normaalissa tilanteessa kuormitusyhdistelmässä otetaan huomioon seuraavat kuormitukset:

- rakenteiden oma paino
- lumikuorma
- tuulikuorma
- putkiston aiheuttama kuormitus
- huoltotason hyötykuorma
- (jääkuorma).

Murtorajatilan kuormitusyhdistelmät määritetään kaavalla 1 (RIL 201-1-2011. 2011, 38).

$$1,15K_{FI} \left. \right\} \sum G_{k,j} + \gamma_P P_k + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + K_{FI} \sum_{i>1} 1,5\psi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 1}$$

Murtorajatilan määrääväksi kuormitusyhdistelmäksi voi tulla myös kaavan 2 mukainen kuormitusyhdistelmä (RIL 201-1-2011. 2011, 38).

$$1,35K_{FI} \left. \right\} G_{k,j} + \gamma_P P_k \quad \text{KAAVA 2}$$

Rakenteen palautuvien taipumien ja siirtymien tarkastelu tehdään käyttörajatilan tavallisen yhdistelmän mukaisille kuormitusyhdistelmille. Käyttörajatilan kuormitusyhdistely tehdään kaavalla 3. (RIL 201-1-2011. 2011, 42.)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 3}$$

Onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmä määritetään kaavalla 4, kun pääasiallisena kuormana on jää-, lumi- tai tuulikuorma (RIL 201-1-2011. 2011, 39).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 4}$$

Vastaavasti, jos pääasiallisena kuormana on muu kuin jää-, lumi- tai tuulikuorma, käytetään onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmän määrittämiseen kaavaa 5 (RIL 201-1-2011. 2011, 39).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 5}$$

Seuraavassa on esitetty kuormien yhdistelykaavoissa käytettävät merkinnät:

$K_{FI}$  = seuraamusluokan mukainen kuormakerroin RIL 201-1-2011 taulukon 2.0S mukaan

$G_{k,j}$  = pysyvän kuorman ominaisarvo

$Q_{k,1}$  = määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,j}$  = muiden muuttuvien kuormien ominaisarvot

$\psi$  = yhdistelykerroin RIL 201-1-2011 taulukon A1.1(FI) mukaan

$P$  = esijännitysvoima

$A_d$  = onnettomuuskuorman mitoitusarvo

## **4.2 Rakenneosien paino**

Putkisillan rakenneosien paino lasketaan rakennusaineiden ja –tarvikkeiden perusteella. Rakenneosien painon ominaisarvona voidaan käyttää laskennollista keskiarvoa, joka lasketaan rakenneosan nimellismittojen ja keskimääräisten tiheyksien perusteella. Rakenneosien painot voidaan usein määrittää valmiiden poikkileikkausarvotaulukoiden perusteella. (RIL 144–2002. 2002, 19.)

## **4.3 Lumikuorma**

Eurokoodin 1 lumikuormaa koskevassa osassa käsitellään tyypillisten rakennusten lumikuormia. Putkisiltarakenteet poikkeavat kuitenkin huomattavasti tavanomaisista katto- ja tasorakenteista, joille lumikuormat voivat kertyä helpommin. Sen vuoksi putkisillalle kertyvää lumikuormaa joudutaan usein arvioimaan kokemusperäiseen tietoon pohjautuen. (Drake – Walter 2010, 244.)

Putkisillalle kertyvän lumikuorman määrää voidaan arvioida kattorakenteiden lumikuormien laskentaperiaatteiden mukaisesti. Tällöin lumikuorman kertymiseen vaikuttaa merkittävästi se, kuinka tiiviisti putket ja kaapelihyllyt on aseteltu sillalle. Lähekkäin asetellut putket ja kaapelihyllyt voivat muodostaa lunta keräävän tason, jolloin lumikuorma voidaan laskea kattorakenteiden mukaisesti. Vastaavasti harvaan aseteltujen putkien päälle voi kertyä ainoastaan pieniä määriä lunta, jolloin lumikuormaa joudutaan arvioimaan tapauskohtaisesti (Drake – Walter 2010, 244). Luvuissa 4.3.1 – 4.3.2 esitetään, kuinka lumikuorma voidaan laskea avonaisilla ja katetuilla putkisilloilla.

### **4.3.1 Avonaisen putkisillan lumikuorma**

Avonaiselle putkisillalle jäävän lumen määrä on kokemusperäisen tiedon mukaan merkityksettömän vähäinen, jos putket sijoitetaan erilleen toisistaan. Putkien päälle mahdollisesti jäävä pieni lumimäärä haihtuu tai sulaa suurimmalta osin pois putkistojen lämpöhäviöiden takia. Avonaisen putkisillan lumikuorma on muihin siltarakenteeseen kohdistuviin kuormiin nähden niin pieni, että se voidaan toisinaan jättää huomioimatta. (Kesti 1991, 34.)

Lumikuorma kuitenkin huomioidaan siltaraketeilla, joissa putket on sijoitettu niin tiiviisti, että putket muodostavat yhtenäisen ja tasomaisen kokonaisuuden. Tällöin lumikuorman otaksutaan kertyvän ainoastaan niille tason osille, joissa putket on aseteltu tiiviisti vierekkäin. Vastaavasti kaapelihyllyille voi kertyä lunta, jonka kuorma huomioidaan orsien mitoituksessa. Toisinaan myös tilaaja voi esittää vaatimukset lumikuorman käytölle. (Drake – Walter 2010, 244.)

Putkien muodostaman tason päälle kertyvä lumikuorma voidaan laskea luvussa 4.3.2 esitettyjen periaatteiden mukaan. Putkiston lämpöhäviöiden vuoksi niiden päälle kertyvää lumikuormaa voidaan pienentää heikosti eristettyjen kattorakenteiden mukaisesti. Lumikuormana  $s_k$  tulee käyttää kuitenkin vähintään arvoa 0,5 kN/m<sup>2</sup>. Tällöin lumikuorma lasketaan koko putkisillan leveydelle. (RIL 201-1-2011. 2011, 113.)

#### 4.3.2 Katetun putkisillan lumikuorma

Katetuilla silloilla lumi kertyy sillan katolle, jolloin kuormat välittyvät reunapalkkien tai ristikoiden välityksellä pilareille. Tällöin lumesta ei aiheudu kuormituksia putkia kannatteleville orsirakenteille. (Jaakkosela 2013, 24.)

Katettujen putkisillojen mitoituksessa katolle kertyvä lumikuorma voidaan laskea samojen periaatteiden mukaan kuin tavanomaisten rakennusten yhteydessä. Putkisillan katon lumikuorman  $s$  ominaisarvo voidaan laskea kaavalla 6. Tällöin lumikuorman suuruuteen vaikuttavat ominaislumikuorma maassa, lumikuorman muotokerroin sekä tuulensuojaisuuskerroin ja lämpökerroin. (RIL 201-1-2011. 2011, 94.)

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

KAAVA 6

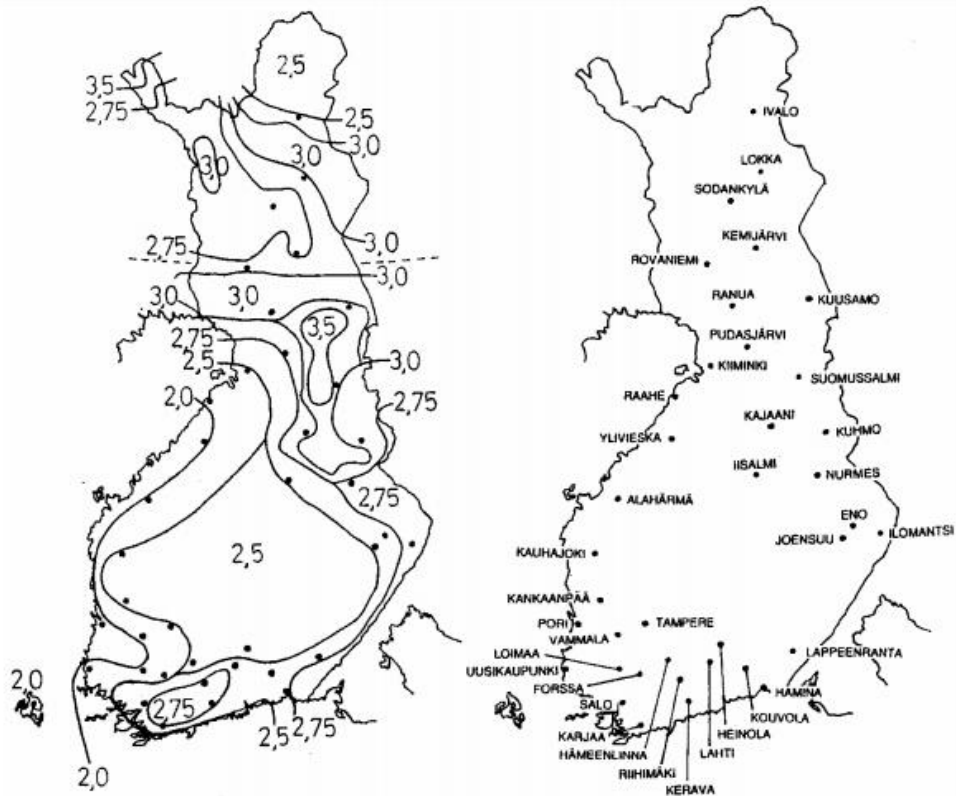
$\mu_i$  = lumikuorman muotokerroin kuvasta 10

$s_k$  = maassa olevan lumikuorman ominaisarvo kuvasta 9

$C_e$  = tuulensuojaisuuskerroin, jonka arvoina käytetään joko 1,0 tai 0,8

$C_t$  = lämpökerroin, jonka arvo on tavallisesti 1,0

Maassa olevan lumikuorman ominaisarvo  $s_k$  määritetään Suomessa kuvan 9 mukaisesti. Kartassa esitettävät arvot ovat lumikuorman minimiarvoja, joten arvoina voidaan käyttää hankekohtaisesti myös suurempia arvoja. (RIL 201-1-2011. 2011, 92.)



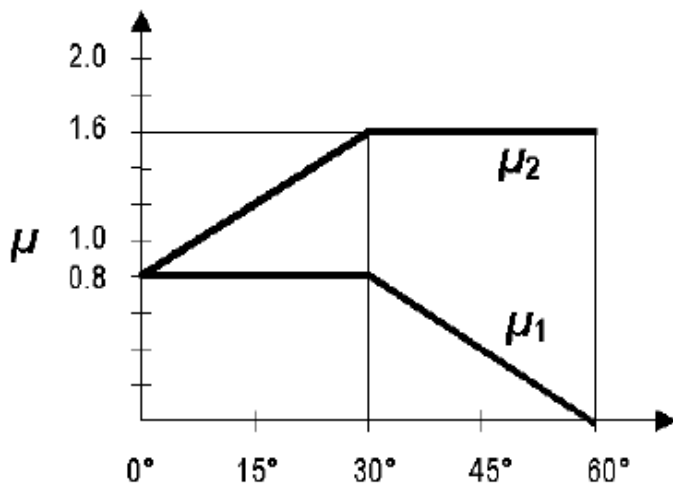
KUVA 9. Maassa olevalle lumikuormalle käytettävät arvot Suomessa (RIL 201-1-2011. 2011, 92)

Tuulensuojaisuskertoimenä  $C_e$  voidaan käyttää arvoa 0,8, kun maastotyyppi on tuulinen. Tässä yhteydessä tuulisella maastotyyppillä tarkoitetaan laakeaa, esteetöntä ja joka puolelta avointa aluetta. Tällöin korkeat rakennuskohteet tai puut eivät anna tuulensuojaa katolle. Tuulensuojaisuskertoimelle käytetään tyypillisesti kuitenkin arvoa 1,0. (RIL 201-1-2011. 2011, 94.)

Mikäli putkien aiheuttaman lämmöntuoton arvioidaan olevan merkittävä, voidaan tarkemman selvityksen perusteella lämpökerrointa  $C_t$  kuitenkin pienentää. Lämpötilakertoimen pienentäminen toteutetaan samojen periaatteiden mukaisesti ku-

ten heikosti lämmöneristetyillä kattorakenteilla. Lumikuormalle käytetään kuitenkin tilanteesta riippumatta vähintään arvoa  $0,5 \text{ kN/m}^2$ . (RIL 201-1-2011. 2011, 94.)

Lumikuorman muotokerrointa tarkastellessa putkisillan kattoa voidaan verrata pulpettikattoon. Tällöin lumikuorman muotokerroin määritetään kuvasta 10. (RIL 201-1-2011. 2011, 95.)



KUVA 10. Lumikuorman muotokertoimet (RIL 201-1-2011. 2011, 95)

Siltarakenteiden katoissa käytettävä kattomuoto on yleensä tasakatto, jolloin muotokertoimen arvo määritetään kuvan 10 vaaka-akselin kohdalta  $0^\circ$ . Tällöin arvoksi saadaan  $0,8$ . Muilla kattokaltevuuksilla muotokerroin määritetään käytetyn kattokaltevuuden perusteella. (RIL 201-1-2011. 2011, 95.)

#### 4.4 Tuulikuorma

Siltarakenteiden ulkopinnoilla on suuri merkitys tuulikuorman vaikutuksiin. Umpinaisilla ja katetuilla siltarakenteilla tuulikuormat vaikuttavat suoraan rakenteen ulkopintoihin aiheuttaen niihin painetta. Ulkopintojen huokoisuuden vuoksi myös rakenteen sisäpintoihin voi välillisesti muodostua tuulenpainetta. Vastaavasti avoimissa siltarakenteissa tuulikuormien vaikutukset kohdistuvat suoraan rakenteiden ulko- ja sisäpinnoille. Tuulenpainet aiheuttavat rakenteiden pintoja vastaan kohtisuoria voimia. Umpinaisilla putkisilloilla, joissa rakenteen pinnat ovat

suuria, tuulikuorma aiheuttaa kohtisuorien voimien lisäksi myös pinnan suuntaisia kitkavoimia. Pinnan suuntaisten kitkavoimien vaikutukset voivat olla rakenteen kannalta merkittäviä ja ne tulee huomioida katettujen siltarakenteiden tuulikuormien laskennassa. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 30.)

Putkisiltojen mitoituksessa tuulikuorma huomioidaan kaikille komponenteille. Tässä yhteydessä komponenteilla tarkoitetaan siltarakenteen osia, kaapelihyllyjä sekä putkistoja. Tuulikuorman vaikutus rakenteeseen riippuu tuulennopeuden lisäksi rakenteen tai rakenneosan pinnanmuodosta, koosta sekä dynaamisista ominaisuuksista. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 30.)

Komponenteista putket ovat poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisia, tukirakenteet ovat muodoltaan putkia, teräväreunaisia profiileja tai ristikoita. Putkisiltojen tuulikuormien määrittämisessä kaikkien osien voidaan yleensä katsoa olevan pinnan muodoltaan edellä mainittujen mukaisia. Kaapelihyllyjä on olemassa erin mallisia ja niiden ulkomuodot voivat poiketa edellä mainituista. Tästä huolimatta niiden ulkomuotoa voidaan verrata esimerkiksi suorakaideputkeen.

#### 4.4.1 Tuulenpaineen määrittäminen

Tuulennopeuden perusarvoon  $v_b$  vaikuttavat tuulen suunta- ja vuodenaikakertoimen lisäksi tuulennopeuden modifioimaton perusarvo. Tuulennopeuden perusarvo lasketaan kaavalla 7. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 32.)

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

KAAVA 7

$c_{dir}$  = suuntakerroin, jonka suositusarvo on 1,0

$c_{season}$  = vuodenaikakerroin, jonka suositusarvo on 1,0

$v_{b,0}$  = tuulennopeuden modifioimaton perusarvo, jonka arvona käytetään Suomen kansallisen liitteen mukaan 21 m/s. (SFS-EN 1991-1-4 NA. 2011, 2.)

Tuulennopeuden modifioituun perusarvoon  $v_m$  vaikuttavat maaston pinnan rosoisuus, pinnan muodostus, tuulennopeuden perusarvo sekä maanpinnan yläpuolinen korkeus. Maastoluokan (I, II, III, IV) mukainen maastokerroin  $k_r$  lasketaan kaavalla 8. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 34.)

$$k_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad \text{KAAVA 8}$$

$z_0$  = maastoluokasta riippuva rosoisuusmitta taulukosta 2

$z_{0,II}$  = maastoluokan II mukainen vertailuarvo, jonka arvona käytetään 0,05 m

Maaston rosoisuusmitta  $z_0$  määritetään suunnittelussa käytettävän maastoluokan perusteella taulukosta 2 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 36).

*TAULUKKO 2. Maastoluokat ja maastoparametrit (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 36)*

Maastoluokka	$z_0$ m	$z_{min}$ m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10

HUOM. Liitekohdassa A.1 on kuvia maastoluokista.

Maastoluokan 0 tuulennopeuden arvoiksi saadaan liian pieniä arvoja, jos maastokerroin lasketaan kaavalla 8. Merialueiden kohdalla kaavalla 8 saatavan maastokertoimen sijaan käytetään arvoa 0,18. (SFS-EN 1991-1-4 NA. 2011, 2.)

Tuulennopeuden modifioidun perusarvon vaihtelu huomioidaan maaston rosoisuuskertoimella. Maaston rosoisuuskerroin lasketaan kaavalla 9. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 34.)

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad \text{kun } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad \text{KAAVA 9a}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{kun } z \leq z_{min} \quad \text{KAAVA 9b}$$



$k_r$  = maastokerroin kaavasta 8 (maastoluokat I - IV) tai 0,18 (maastoluokka 0)

$Z$  = rakenteen korkeus

$Z_0$  = maastoluokan mukainen rosoisuusmitta taulukosta 2

$Z_{min}$  = maastoluokan mukainen minimikorkeus taulukosta 2

$Z_{max}$  = mitta, jonka arvona käytetään 200 m

Tuulennopeuden modifioitu perusarvo  $v_m(z)$  korkeudella  $z$  lasketaan kaavalla 10 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 35).

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad \text{KAAVA 10}$$

$c_r(z)$  = maaston rosoisuuskerroin kaavasta 9

$c_0(z)$  = maaston pinnan muotokerroin, jolle voidaan käyttää tavallisesti arvoa 1,0

$v_b$  = tuulennopeuden perusarvo kaavasta 7

Tuulesta aiheutuu pyörteitä, joiden turbulenssin keskihajonta  $\sigma_v$  lasketaan kaavalla 11 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 38).

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_l \quad \text{KAAVA 11}$$

$k_r$  = maastokerroin kaavasta 8

$v_b$  = tuulennopeuden perusarvo kaavasta 7

$k_l$  = pyörteisyyskerroin, jonka suositusarvo on 1,0

Tuulenpuuskien intensiteetti  $I_v(z)$  korkeudella  $z$  lasketaan turbulenssin keskihajonnan ja tuulennopeuden modifioidun arvon perusteella kaavalla 12 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 38).

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} \quad \text{kun } z_{min} \leq z < z_{max} \quad \text{KAAVA 12a}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{kun } z \leq z_{min} \quad \text{KAAVA 12b}$$

$\sigma_v$  = turbulenssin keskihajonta kaavasta 11

$V_m(z)$  = tuulennopeuden modifioitu perusarvo kaavasta 10

$Z_{min}$  = maastoluokan mukainen minimikorkeus taulukosta 2

$Z_{max}$  = mitta, jonka arvona käytetään 200 m

Korkeudella  $z$  vallitseva puuskanopeuspaine  $q_p(z)$  lasketaan kaavalla 13 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 40).

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad \text{KAAVA 13}$$

$I_v(z)$  = tuulenpuuskien intensiteetti kaavasta 12

$\rho$  = ilman tiheys, jonka suositusarvo on 1,25 kg/m<sup>3</sup>

$V_m(z)$  = tuulennopeuden modifioitu perusarvo kaavasta 10

#### 4.4.2 Sauvarakenteiden tuulikuormat

Putkisillat ovat rakenteeltaan joko ristikko- tai palkkirakenteita. Tukirakenteet ovat tuulikuorman kannalta tarkasteltuna sauvamaisia rakenteita. Sauvarakenteisiin kohdistuu tuulikuormaa aivan kuten tavanomaisiin rakennuksiinkin, mutta niihin kohdistuvat tuulikuormat määritetään kuitenkin hiukan eri tavalla. Sauvarakenteiden tuulikuormat lasketaan kaavalla 14. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 44.)

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref} \quad \text{KAAVA 14}$$

$c_s c_d$  = rakennekerroin, jonka arvona voidaan käyttää 1, kun rakenteen korkeus on alle 15 metriä

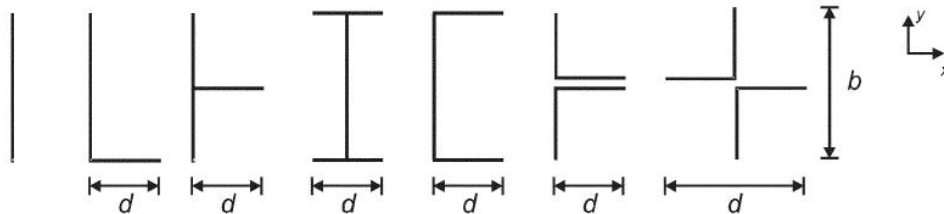
$c_f$  = rakenteen tai rakenneosan voimakerroin lukujen 4.4.3, 4.4.4 ja 4.4.5 mukaan

$q_p(z)$  = puuskanopeuspaine kaavasta 13

$A_{ref}$  = rakenteen tai rakenneosan tuulenpaineen vaikutusala lukujen 4.4.3, 4.4.4 ja 4.4.5 mukaan

#### 4.4.3 Teräväsärmäisen sauvan voimakerroin

Kuvassa 11 esitettävien teräväsärmäisten avoprofiilien voimakertoimet  $c_f$  määritetään kaavalla 15 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 116).



KUVA 11. Teräväsärmäiset poikkileikkaukset (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 116)

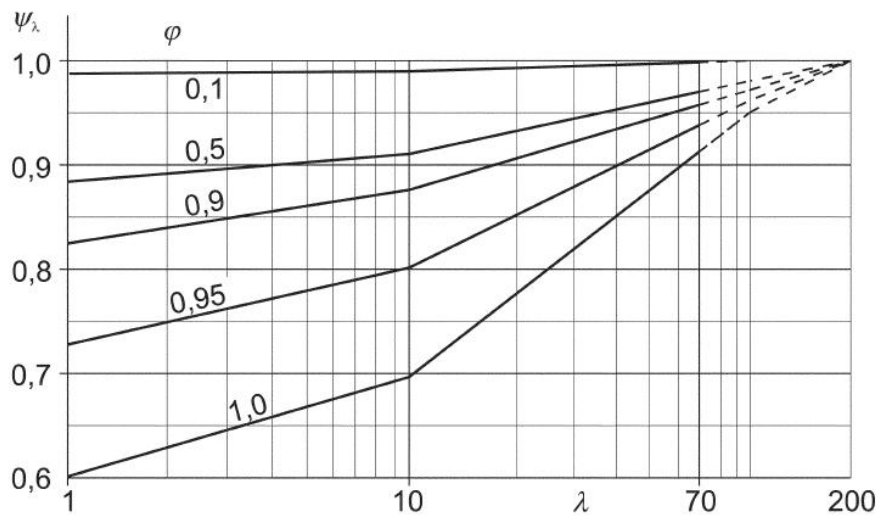
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$

KAAVA 15

$c_{f,0}$  = rakenneosan voimakerroin ilman päätevaikutuksia, suositus arvo 2,0

$\psi_\lambda$  = päätevaikutuskerroin kuvasta 12

Kuvasta 12 määritetään sauvarakenteelle päätevaikutuskerroin  $\psi_\lambda$ , jolla huomioidaan rakenneosan vapaan pään ohi virtaaman ilman vaikutus (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 140).



KUVA 12. Päätevaikutuskertoimen suuntaa antavia arvoja (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 140)

Päätevaikutuskerroin määritetään rakenneosan eheyssuhteen sekä tehollisen hoikkuuden perusteella. Eheyssuhde  $\varphi$  lasketaan kaavalla 16. Yksittäisen sauvan voimakerronta määrittäessä eheyssuhdetta ei kuitenkaan tarvitse erikseen laskea, sillä sauvan projektioala ja sauvan reunaviivojen rajaama pinta-ala ovat yhtä suuret. Yksittäisen sauvan eheyssuhteen arvoksi saadaan aina 1. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 140.)

$$\varphi = \frac{A}{A_c}$$

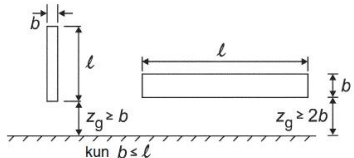
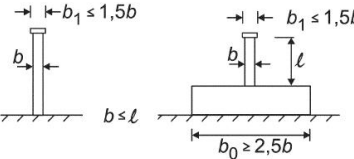
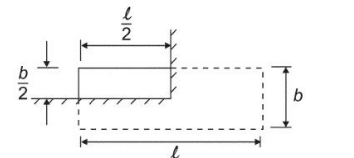
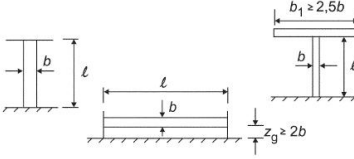
KAAVA 16

$A$  = sauvan projektioala

$A_c$  = reunaviivan rajaama pinta-ala

Sauvan tehollinen hoikkuus  $\lambda$  määritellään rakenteen mittojen ja sijainnin perusteella. Taulukossa 3 on esitetty tehollisen hoikkuuden suositusarvoja. Sauvarakenteiden ja ristikkojen tehollinen hoikkuus määritetään taulukon ylimmän rivin mukaan. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 138.)

TAULUKKO 3. Tehollisen hoikkuuden  $\lambda$  suositusarvot (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 138)

No.	Rakenteen sijainti, tuuli kohtisuorassa kuvatasoa vastaan	Tehollinen hoikkuus $\lambda$
1		Monikulmio-, suorakaide- ja teräväsärmäisille profiileille ja ristikkorakenteille: kun $l \geq 50$ m, $\lambda = 1,4$ // $b$ tai $\lambda = 70$ , sen mukaan, kumpi on pienempi
2 <sup>2)</sup>		kun $l < 15$ m, $\lambda = 2$ // $b$ tai $\lambda = 70$ , sen mukaan, kumpi on pienempi  Ympyräsyntereille: kun $l \geq 50$ m, $\lambda = 0,7$ // $b$ tai $\lambda = 70$ , sen mukaan, kumpi on pienempi
3		Pituuden $l$ väliarvoilla käytetään lineaarista interpolointia.
4		kun $l \geq 50$ m, $\lambda = 0,7$ // $b$ tai $\lambda = 70$ , sen mukaan, kumpi on suurempi kun $l < 15$ m, $\lambda = //b$ tai $\lambda = 70$ , sen mukaan, kumpi on suurempi  Pituuden $l$ väliarvoilla käytetään lineaarista interpolointia.

#### 4.4.4 Suorakaiteen muotoisen sauvan voimakerroin

Poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoisen rakenneosan voimakerroin  $c_f$  määritetään kaavalla 17 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 112).

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda$$

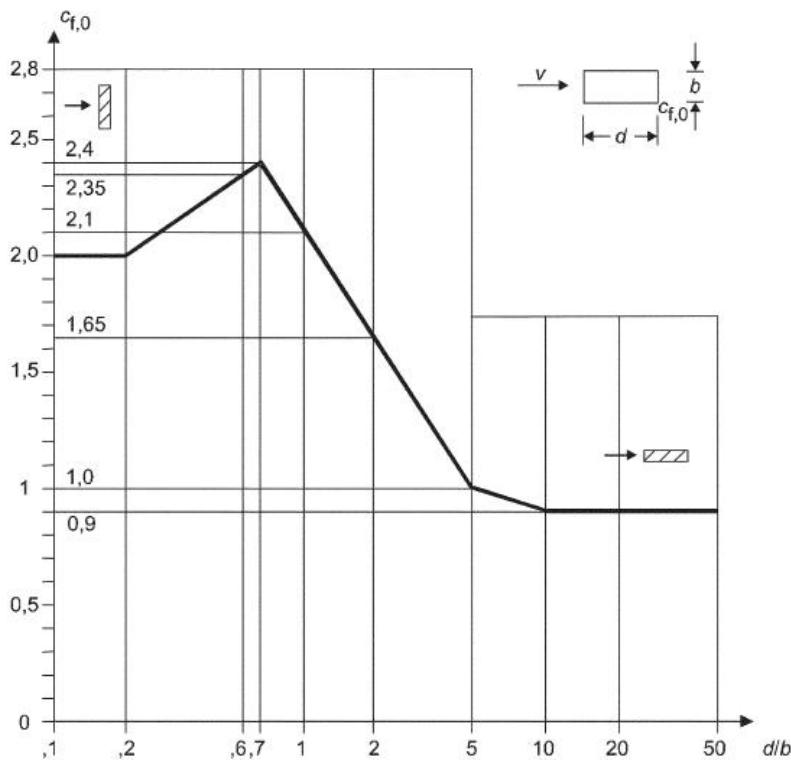
KAAVA 17

$c_{f,0}$  = terävsärmäisen suorakaidepoikkileikkauksen voimakerroin ilman päätevaikutuksia, kuvasta 13

$\psi_r$  = pyöreäsärmäisen neliöpoikkileikkauksen pienennyskerroin, jonka likimääräinen yläraja-arvo määritetään kuvasta 14

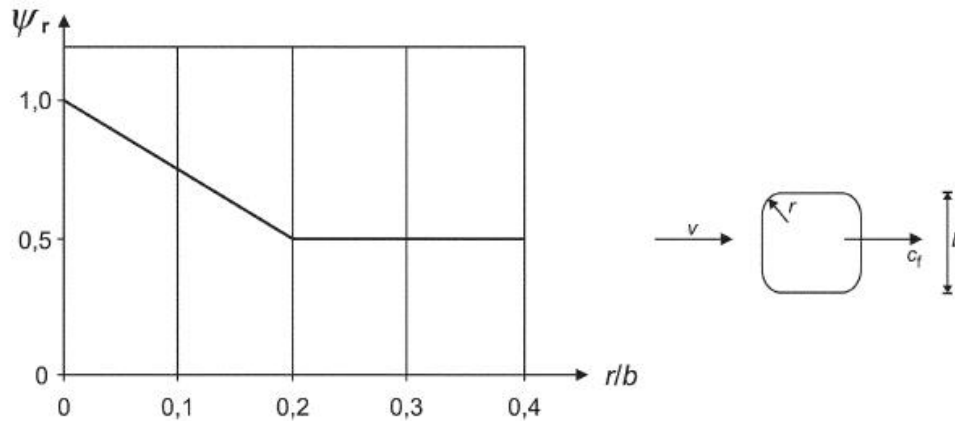
$\psi_\lambda$  = päätevaikutuskerroin kohdan 4.4.3 mukaan

Poikkileikkaukseltaan terävsärmäisen poikkileikkauksen voimakerroin määritetään sivusuhteen  $d/b$  perusteella kuvasta 13 (SFS-EN 1991-1-4+ AC + A1. 2011, 114).



KUVA 13. Terävsärmäisen suorakaidepoikkileikkauksen voimakerroin  $c_{f,0}$ , kun vapaan pään ohittavaa virtausta ei huomioida (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 114)

Pyöreäsärmäisen neliöpoikkileikkauksen voimakerrointa voidaan pienentää kuvasta 14 määritettävän kertoimen perusteella. Kertoimella huomioidaan poikkileikkauksen pyöristettyjen nurkkien vaikutus tuulen voiman suuruuteen. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 114.)

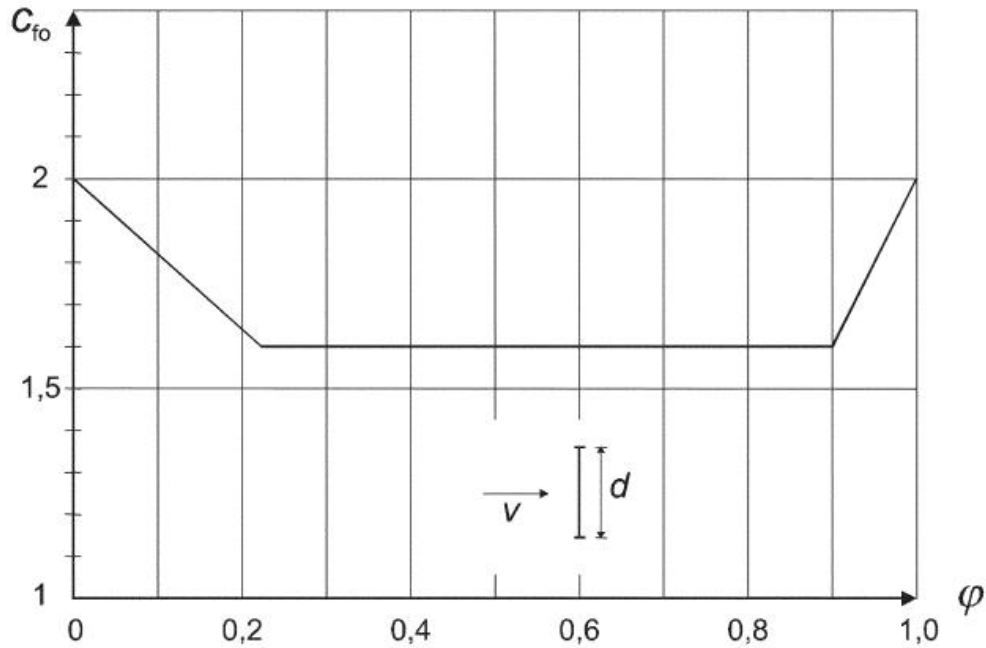


KUVA 14. Pienennyskerroin  $\psi_r$  pyöristetyille neliöpoikkileikkauksille (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 114)

#### 4.4.5 Ristikorakenteen voimakeroin

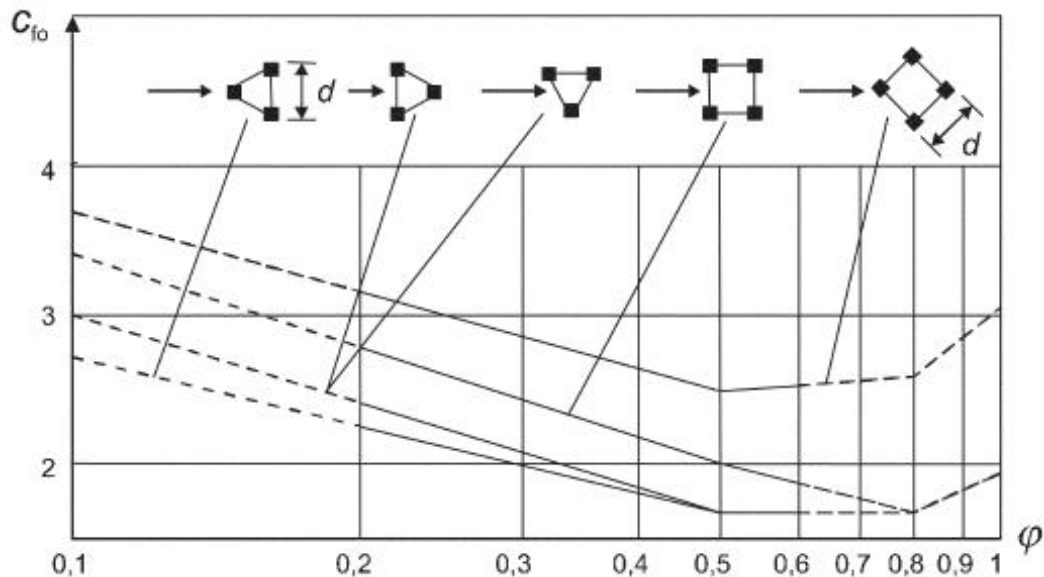
Tuulikuorma vaikuttaa ristikkorakenteeseen samalla tavalla kuin palkkirakenteeseen. Ristikoiden tuulikuormat määritetään kuitenkin eri tavalla kuin palkkirakenteen. Tässä esitettävä tuulikuorman voimakertoimen määrittämistapa sopii sekä ristikkopylväille että kattoristikoille. Ristikorakenteiden tuulikuormat  $F_w$  lasketaan luvun 4.4.2 mukaan.

Ristikorakenteiden voimakeroin lasketaan luvun 4.4.3 mukaan kaavalla 15, mutta tässä yhteydessä parametri  $c_{f,0}$  kuvaa ristikkorakenteen voimakerrointa ilman päätevaikutuksia ja  $\psi_\lambda$  kuvaa ristikon päätevaikutuserrointa. Tasoristikon voimakeroin voidaan määrittää ristikon eheysuhteen perusteella kuvasta 15. (SFS EN-1991-1-4 + AC + A1. 2011, 132.)



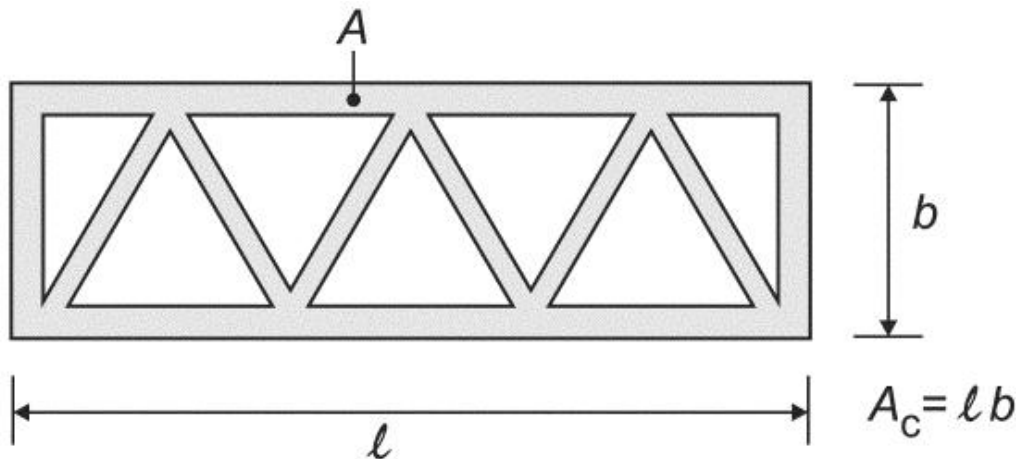
KUVA 15. Tasoristikkorakenteen voimakerroin  $c_{f,0}$  eheysuhteen  $\varphi$  funktiona (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 132)

Avaruusristikon voimakerroin määritetään vastaavalla tavalla kuvasta 16. Tällöin voimakerroin saadaan määritettyä ristikon eheysuhteen ja ristikkokohtaisen käyrästön perusteella. (SFS EN-1991-1-4 + AC + A1. 2011, 132.)



KUVA 16. Teräväsärmäisistä sauvoista muodostetun avaruusristikon voimakerroin  $c_{f,0}$  eheysuhteen  $\varphi$  funktiona (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 132)

Ristikkorakenteen eheyssuhde  $\phi$  määritetään luvun 4.4.3 mukaan kaavalla 16. Tässä yhteydessä kaavassa 16 esiintyvä  $A$  on ristikon tarkasteltavalle sivulle projisoidun sivun sauvojen ja nurkkalevyjen projektiopinta-alojen summa. Vastavasti  $A_c$  on ristikon ulkoreunojen rajaama pinta-ala (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 134). Ristikkorakenteen tuulikuroman laskennassa käytettäviä pinta-aloja on havainnollistettu kuvassa 17.



KUVA 17. Eheyssuhteen  $\phi$  määrittämiseen käytettävät pinta-alat (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 140)

Projektiopinta-alojen summa lasketaan kaavalla 18 (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 134).

$$A = \sum_i b_i \cdot l_i + \sum_k A_{gk}$$

KAAVA 18

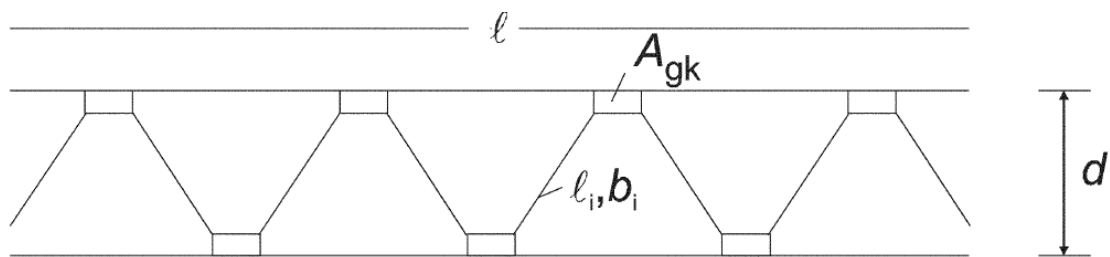
$b_i$  = yksittäisen sauvan leveys

$l_i$  = yksittäisen sauvan pituus

$A_{gk}$  = nurkkalevyn k pinta-ala



Ristikkorakenteen projektiopinta-alojen laskennassa käytettäviä suureita on havainnollistettu kuvassa 18.



KUVA 18. Ristikkorakenteen mitat. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 140)

Ristikkorakenteiden tuulikuorma lasketaan luvun 4.4.2 mukaan kaavalla 14. Tuulikuorman vaikutusalueena  $A_{ref}$  käytetään ristikkorakenteilla kaavan 18 mukaista projektiopinta-alojen summaa  $A$ . (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011, 132.)

Ristikon päätevaikutuskerroin määritetään luvussa 4.4.3 esitetyn mukaan kuvasta 12.

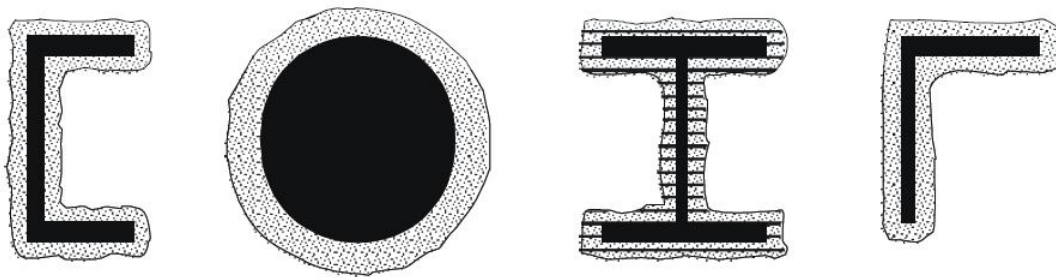
#### 4.5 Jääkuorma

Suomen rakennusnormeissa käsitellään ainoastaan katoille kertyvää lumikuormaa, eikä jääkuormaa tyypillisesti huomioida kuin ainoastaan korkeissa rakenteissa (Makkonen 2011, 91). Standardi ISO 12494:2001 kuitenkin painottaa, että avonaisilla rakenteille tulisi arvioida jonkinlainen jääkuorma, sen sijaan, että jääkuorma jätettäisiin kokonaan huomioimatta. Tässä luvussa 4.5 esitettävä jääkuormien määrittämistapa perustuu ISO 12494:2001 -standardiin sekä Suomen mastorakenteiden jääkuormien laskentaperiaatteisiin.

Putkien sekä siltarakenteiden päälle muodostunut jää aiheuttaa kantaville rakenteille pystykuormitusta. Standardissa ISO 12494:2001 Atmospheric icing of structures osoitetaan perusteet ja suunnitteluparametrit jääkuormien laskentaan, mutta paikkakohtaiseen jään luokitukseen tai jään tiheyteen siinä ei kuitenkaan oteta kantaa. Tämän vuoksi putkisiltojen jääkuormat määritetään hankekohtaisesti soveltaen standardeja EN 1993-3 ja ISO 12494:2001.

Standardin ISO 12494:2001 mukaan rakenteen pinnalle muodostunut jää kasvat-  
taa tuulelle altista pintaa ja tällöin lisää myös rakenteelle kohdistuvaa tuulikuor-  
maa. Jäätyneen rakenteen tuulikuormat lasketaan samojen periaatteiden mukai-  
sesti kuin tavanomaisesti, mutta jään vaikutus kohtisuoraan projektiopinta-alaan  
otetaan laskennassa kuitenkin huomioon. Tuuli- ja jääkuorman yhteisvaikutusta  
ei tarvitse yleensä huomioida muualla kuin korkeissa rakenteissa, kuten mas-  
toissa ja piipuissa. (ISO 12494:2001. 2001, 4.)

Kun rakenteisiin kertyvää jääkuormaa arvioidaan, voidaan olettaa, että rakenne-  
osien pinnoille muodostuu tasainen jääkerros kuvan 19 mukaan. Todellisuudessa  
jää voi kuitenkin muodostua epäsymmetrisesti rakenneosien ympärille. Epäsym-  
metrisestä jään muodostumisesta aiheutuneet kuormitukset huomioidaan aino-  
astaan korkeilla masto- ja piippurakenteilla. (SFS-EN 1993-3-1 + AC. 2006, 51.)



*KUVA 19. Jään muodostuminen rakenneosiin (SFS-EN 1993-3-1 + AC. 2006, 52)*

Ilmastollinen jäätyminen luokitellaan muodostumistavan perusteella joko huurre-  
jääksi tai jäätävän sateen aiheuttamaksi jääksi. Mitoitustilanteessa näistä huomi-  
oidaan Suomen mastorakenteissa ainoastaan huurrejää, mikä määräytyy jääluo-  
kan sekä tarkasteltavan kohdan ja ympäröivän maaston korkeuseron perusteella.  
(SFS-EN 1993-3-1 + AC. 2006, 51.)

Suomessa jääkuormat voidaan määrittää jääluokan R1 mukaan, sillä putkisillat  
ovat aina alle 50 metriä korkeita rakennelmia (SFS-EN 1993-3-1 NA. 2010, 7).  
Jääkuorma voidaan määrittää halkaisijaltaan tai leveydeltään alle 300 mm:n ra-  
kenneosalle taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Jään paino yksittäiselle rakenneosalle, jonka halkaisija tai leveys on alle 300 mm (SFS-EN 1993-3-1 NA. 2010, 7)

Jääluokka	H (m)	$g_i$ (kg/m)
R1	0 - 50	0,5
R2	50 - 100	0,9
R3	100 - 150	1,6
R4	150 - 200	2,8
R5	200 - 250	5,0
R6	250 - 300	8,9
R7	300 - 350	16,0
R8	350 - 400	28,0
R9	400 - 450	50,0

Poikkileikkaukseltaan umpinaisen, yli 300 mm leveän rakenneosan jääkuorma määritetään jääluokan (R1) mukaan taulukosta 5 (ISO 12494:2001. 2001, 17).

TAULUKKO 5. Umpinaisen, yli 300 mm leveän rakenneosan jään paino (ISO 12494:2001. 2001, 17)

Cross-sectional shape of object: Large, rounded objects							
Object width, mm		300	500	1 000	3 000	5 000	
IC	Ice mass	Ice length, $L$ (mm), and mass, $m$ (kg/m)					
	$m$ , kg/m	$L$ , all dim.	$m$	$m$	$m$	$m$	$m$
R1	0,5	4	0,5	0,9	2,0	6,2	10,5
R2	0,9	8	0,9	1,7	3,6	11,2	18,9
R3	1,6	14	1,6	3,0	6,4	19,9	33,5
R4	2,8	24	2,8	5,2	11,1	34,9	58,7
R5	5,0	42	5,0	9,2	19,9	62,3	105
R6	8,9	76	8,9	16,5	35,3	111	186
R7	16,0	136	16,0	29,6	63,5	199	335
R8	28,0	217	28,0	49,7	104	321	538
R9	50,0	344	50,0	84,4	171	515	859
R10	To be used for extreme ice accretions						

Vastaavasti poikkileikkaukseltaan teräväreunaisen, yli 300 mm leveän rakenneosan jääkuorma määritetään jääluokan (R1) mukaan taulukosta 6 (ISO 12494:2001. 2001, 17).

*TAULUKKO 6. Teräväreunaisen, yli 300 mm leveän rakenneosan jään paino (ISO 12494:2001. 2001, 17)*

Cross-sectional shape of object: Large, flat objects							
Object width, mm		300	500	1 000	3 000	5 000	
IC	Ice mass	Ice length, <i>L</i> (mm), and mass, <i>m</i> (kg/m)					
	<i>m</i> , kg/m	<i>L</i> , all dim.	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
R1	0,5	4	0,5	0,9	2,0	6,2	10,5
R2	0,9	8	0,9	1,7	3,6	11,2	18,9
R3	1,6	14	1,6	3,0	6,4	19,9	33,5
R4	2,8	24	2,8	5,2	11,1	34,9	58,7
R5	5,0	42	5,0	9,2	19,9	62,3	105
R6	8,9	76	8,9	16,5	35,3	111	186
R7	16,0	136	16,0	29,6	63,5	199	335
R8	28,0	224	28,0	50,4	106	330	554
R9	50,0	361	50,0	86,1	176	537	898
R10	To be used for extreme ice accretions						

## 4.6 Hyötykuormat

### Tyhjäpaino

Teollisuusputkiston tyhjäpaino muodostuu putkiston omasta painosta, putkiston eristyksestä, kaapelihyllyjen painosta, prosessilaitteiden sekä venttiilien painosta. Tällöin putkiston tyhjäpainona käytetään tyypillisesti likiarvoa 60 % putkiston käyttöpainosta. Kaapelihyllyjen kuormat arvioidaan käytettyjen hyllyjen perusteella. (Drake – Walter 2010, 242.)

### Testipaino

Teollisuusputkiston testauksessa käytettävästä kuormituksesta käytetään nimitystä testipaino. Testaustilanteen kuormituksena on putkiston tyhjäpainon lisäksi myös virtaava aine. (Drake – Walter 2010, 242.)

## **Käyttöpaino**

Teollisuusputkiston käyttöpaino sisältää putkiston tyhjäpainon lisäksi myös prosessissa käytettävien virtaavien aineiden painot. Putkiston ja kaapelihyllyjen kuormana voidaan käyttää niiden varsinaisia kuormia. Vaihtoehtoisesti kuormina voidaan käyttää myös yhtenäisiksi arvioituja kuormia, jotka asiakas tai putkistosuunnittelija esittää rakennustehtäväpiirustuksessa. (Drake – Walter 2010, 242.)

## **Hoitotason kuormat**

Putkisiltojen suunnittelua koskevissa teknisissä tiedoissa kerrotaan, mille kuormalle ne suunnitellaan. Hoitotason standardin mukaisena kuorman arvona käytetään vähintään 2 kN/m<sup>2</sup>:n tasaista kuormitusta. Lisäksi hoitotason kestävyyskannalta epäedullisimpaan kohtaan sijoitetaan, 200 x 200 mm:n suuruiselle alueelle jakautuneena, 1,5 kN:n suuruinen kuorma. (SFS-EN ISO 14122-2 + A1. 2010, 16.)

Tilaaajan tehdasstandardissa tai suunnitteluperusteissa määrätään kuitenkin yleensä hoitotasoilla käytettävät kuormitukset. Tyypillisesti pienillä hoitotasoilla kuormituksen arvona käytetään 2-3 kN/m<sup>2</sup> ja suuremmilla hoitotasoilla arvona 5-10 kN/m<sup>2</sup>. (Derry 2016.)

## **4.7 Muut kuormat**

### **4.7.1 Kitkakuorma**

Siltarakenteen ja putkiston välille syntyy vaakasuuntaisia kuormituksia, jotka aiheutuvat niiden erilaisen lämpölaajenemisen seurauksena syntyneistä kitkavoimista. Kitkavoiman suuruuteen vaikuttavat putkiston luistin sekä kannatinorren välinen kitkakerroin sekä kuormituspaino. Standardissa 7302 esitetään eri kannaketyypeille käytettäviä kitkakertoimen arvoja. (PSK 7302. 2014, 4.)

Kitkavoiman suuruutta voidaan arvioida laskemalla koko siltarakenteen matkalla kertyneet lepokitkavoimat yhteen. Tällöin yleensä oletetaan, että kaikki putket liukuvat samanaikaisesti ja aiheuttavat yhdensuuntaisia kitkavoimia. Rakenteiden lujuuslaskennan kannalta tämä oletus antaa varmallalla puolella olevia voimasuureita, mutta johtaa toisinaan liian suuriin siirtymiin käyttörajatilan tarkasteluissa. (Kesti 1991, 43.)

Jussi Jaakkosela on tehnyt diplomityön aiheesta Putkisillan lämpöliikkeiden aiheuttamien voimien määrittäminen siltalohkojen liitoksille ja kiintopisteille (2013). Diplomityössään Jaakkosela on käynyt läpi kitkavoimien pienentäviä tekijöitä ja esittänyt tarkemman menetelmän siltarakenteisiin kohdistuvien vaakavoimien tarkastelemiseksi.

Tilanne, jossa kaikki putket liukuvat samanaikaisesti, syntyy putkisillan lämpölaajenemisessa. Tällöin on kuitenkin epätodennäköistä, että kaikissa putkissa vaikuttaa täysi pystykuormitus, jolloin todellisessa tilanteessa kitkavoiman suuruudet voivat olla pienempiä kuin yleisessä laskentatavassa. (Jaakkosela 2013, 19.)

#### **4.7.2 Törmäyskuormat**

Putkisiltaan törmäyksistä aiheutuvia paikallisia vaurioita voidaan pitää siedettävänä, jos rakenteiden vaurio ei vaaranna koko rakenteen stabiiliutta tai rakenteen kestävyyttä kokonaisuutena. Pelastusteiden ylittävät siltarakenteet suunnitellaan kestäväksi onnettomuustilanteessa sortumatta tai lähes sortumatta siten, että sortuma-aste sallitaan riittävän pieneksi. Tällöin rakenne sallii onnettomuustilanteesta riippumatta välttämättömien pelastustehtävien toteuttamisen tehdasalueella. (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 26.)

Vaihtoehtoisesti tilaajan tehdasstandardissa voidaan määrittää onnettomuustilanteessa hyväksyttävät riskitasot. Tällöin onnettomuuskuormien esiintymiselle ja seuraamuksille sallitaan haluttu varmuus. Tilaaja voi vastaavasti myös määrittää suojaamistavan törmäyksiä vastaan, jolloin rakenteisiin kohdistuvaa onnettomuusriskiä voidaan pienentää. (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 26.)

Jatkuva sortuma otetaan onnettomuustilanteessa huomioon ainoastaan tarkoituksenmukaisella tasolla, sillä täydellinen rakenteiden sortumisen estäminen voi olla käytännön tilanteessa mahdotonta toteuttaa tai se johtaa taloudellisesti kannattamattomiin rakenteisiin. Jatkuvan sortuman riskiä voidaan vähentää välttämällä jatkuvia rakenteita. Tällöin kuitenkin putkisillan paikallisen vaurioitumisen riski yleensä kasvaa. (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 74.)

Seuraavissa luvuissa esitetään, miten huomioidaan standardin SFS-EN 1991-1-7 mukaan putkisillan eri rakenneosiin kohdistuvat törmäykset ja niiden vaikutukset.

### Törmäyskuorma kantaviin pilareihin

Ajoneuvon törmäminen otetaan huomioon tien välittömässä läheisyydessä olevan siltarakenteen kantaviin pilareihin mitoittamalla rakenteet staattiselle vaakakuormitukselle standardin SFS-EN 1991-1-7 mukaisesti. Tällöin törmäyskuorman arvo  $F_{dx}$  valitaan taulukosta 7. Kuorman vaikutuspiste määräytyy standardissa esitetyn mukaisesti törmäävän ajoneuvotyypin mukaan. (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 32.)

*TAULUKKO 7. Alusrakenteisiin kohdistuvista ajoneuvon törmäyksistä aiheutuvat ekvivalentit staattiset mitoituskuormat (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 32)*

Liikenteen luokka	Kuorma $F_{dx}$ <sup>a</sup> [kN]	Kuorma $F_{dy}$ <sup>a</sup> [kN]
Mootoritiet sekä valta- ja kantatiet	1 000	500
Maantiet	750	375
Taajamien tiet ja kadut	500	250
Pihat ja autotallit, joihin:		
— henkilö- ja pakettiautot pääsevät kulkemaan	50	25
— kuorma-autot pääsevät kulkemaan <sup>b</sup>	150	75

<sup>a</sup> x = normaali liikenteen suunta, y = normaalin liikenteen suuntaa vastaan kohtisuoraan.  
<sup>b</sup> Termi ”kuorma-auto” tarkoittaa ajoneuvoja, joiden suurin bruttopaino on yli 3,5 tonnia.

## Törmäyskuorma ylärakenteisiin

Kun putkisilta ylittää tien, joudutaan ajoneuvoliikenteen törmäykset ottamaan huomioon tien viereisten pilarien ja vaakasuuntaisten rakenteiden mitoituksessa. Tällöin siltarakenteen pituussuuntaiset rakenneosat mitoitetaan taulukon 8 mukaisille staattisille mitoituskuormille. Törmäyskuormaa ei tarvitse kuitenkaan huomioida, jos siltarakenteen alikulkukorkeus on riittävä. Ylärakenteisiin kohdistuvaa törmäyskuormaa ei tarvitse huomioida, jos alikulkukorkeutena käytetään 5,0 m – 6,0 m tai jos alikulkukorkeutta on rajoitettu pysyvillä esteillä. (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 34.)

*TAULUKKO 8. Ylärakenteisiin kohdistuvista ajoneuvon törmäyksistä aiheutuvat ekvivalentit staattiset mitoituskuormat (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 34)*

Liikenteen luokka	Ekvivalentti staattinen mitoituskuorma $F_{dx}^a$ [kN]
Moottoritiet sekä valta- ja kantatiet	500
Maantiet	375
Taajamien tiet ja kadut	250
Pihat ja autotallit	75
<sup>a</sup> $x$ = normaali liikenteen suunta.	

## Haarukkatrukkien törmäys

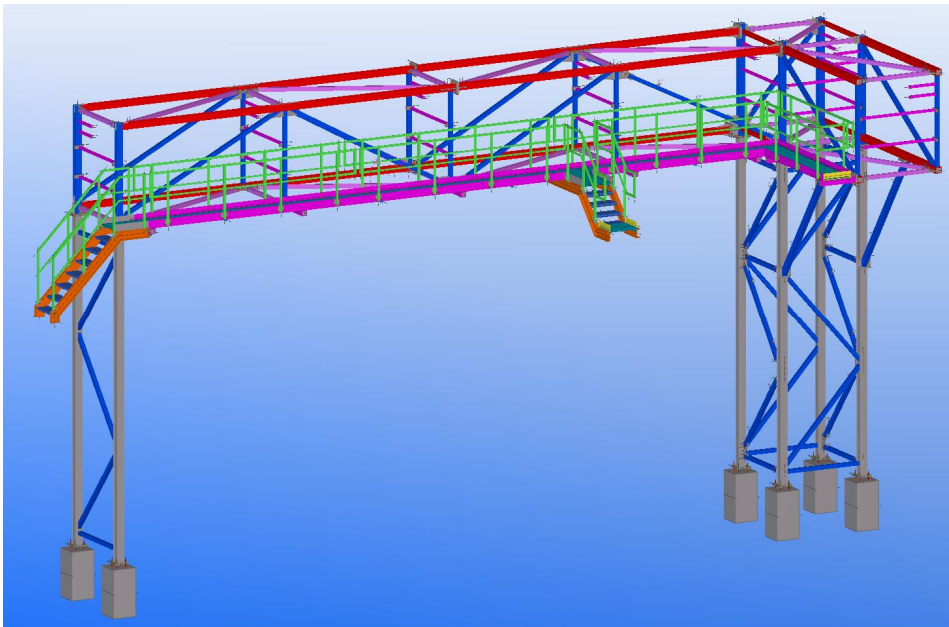
Haarukkatrukkien törmäyskuormien mitoitusarvot voidaan määrittää tapauskohtaisesti haarukkatrukin ja rakenteen dynaamisen toiminnan perusteella. Tällöin mitoituskuormien määrittäminen tehdään standardin SFS-EN 1991-1-7 liitekohdassa C.2.2 esitetyn pehmeän törmäyksen suunnittelumenetelmän mukaisesti. (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 38.)

Standardin SFS-EN 1991-1-7 luvun 4.4 mukaan mitoituskuormana käytetään ekvivalenttia staattista mitoituskuormaa  $F$ , ellei tarkempaa menetelmää käytetä. Tällöin törmäysvoiman  $F$  suuruutena käytetään viidenkertaista (5) trukin nettopainon ja taakan painon summaa  $5W$ . Kuorma  $W$  määritetään standardin SFS-EN 1991-1-1 taulukon 6.5 mukaan. (SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC. 2014, 38.)



## 5 ESIMERKKI PUTKISILLAN LASKENNALLISESTA TARKASTE- LUSTA

Opinnäytetyössä esitettyjen kuormien laskentaperusteiden pohjalta tarkasteltiin Keski-Pohjanmaalle rakennetun teräsrakenteisen putkisillan mitoitus. Kyseinen putkisilta valittiin mitoitus tarkastelun kohteeksi, koska sen mittasuhteet ja alueen ilmastolliset olosuhteet olivat sellaiset, että siltarakenteen mitoitus tarkastelut voitiin tehdä tässä työssä esitettyjen kuormien perusteella. Esimerkkikohteen rakennetta havainnollistetaan kuvassa 20.

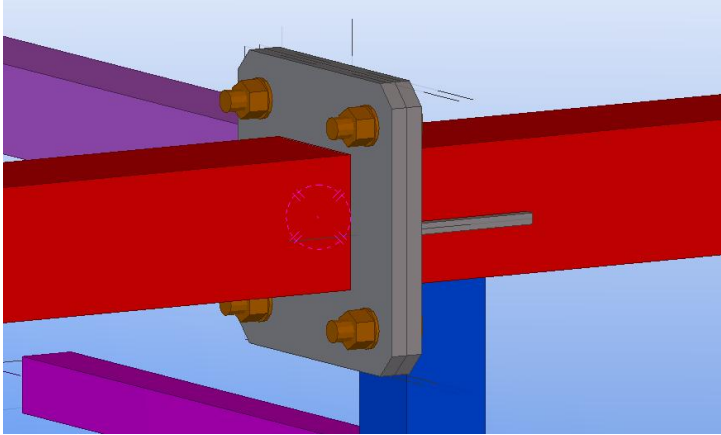


KUVA 20. Esimerkkikohteen rakenne (Putkisilta 2015)

Rakennetyyppinä käytettiin ristikkorakennetta, koska suunniteltavasta putkisillasta tehtiin samanlainen kuin alueelle aiemmin rakennetut putkisillat. Rakenteen jänneväli oli noin 15 metriä, minkä vuoksi rakennetyyppiä voitiin pitää myös kustannustehokkaampana vaihtoehtona palkkirakenteiseen putkisillan verrattuna.

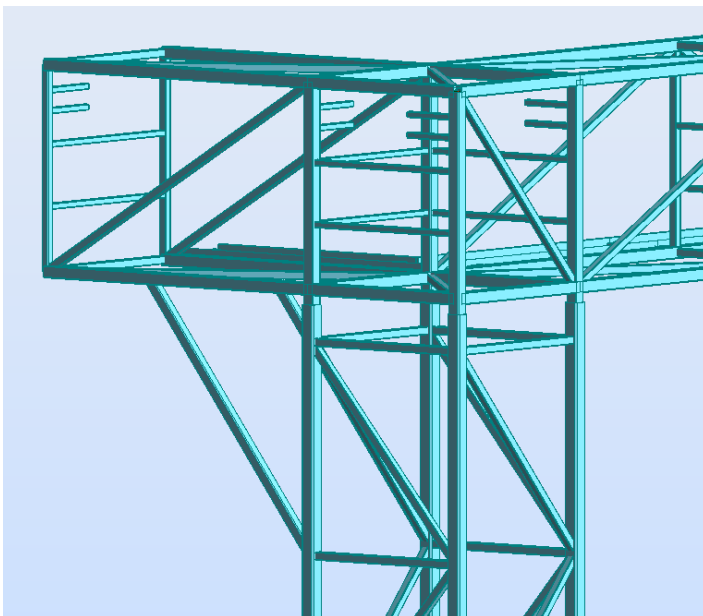
Putkisillalle suunniteltiin kolme putkien kannatukseen tarkoitettua kannatusortta sekä kaksi kaapeliyhlyjen kannatukseen tarkoitettua ortta. Rakenteen kokoami-

sen ja asennettavuuden vuoksi siltarakenne jaettiin kolmeen runklohkoon. Siltalohkot kiinnitettiin toisiinsa kuvan 21 mukaisilla päätylevyliitoksilla. Siltalohkojen kannatus toteutettiin kahdella vinositein jäykistetyillä pilariryhmällä.



*KUVA 21. Runkolohkojen päätylevyliitos (Putkisilta 2015)*

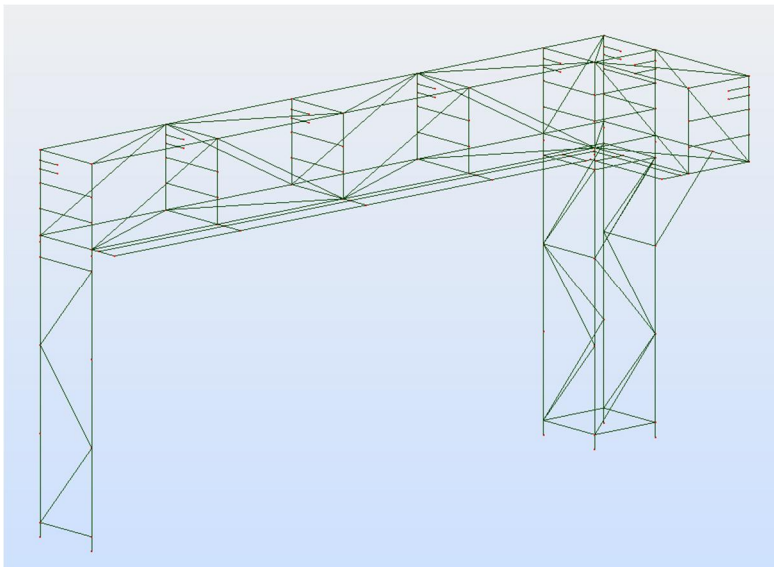
Putkisillan L-haara toteutettiin kuvan 22 mukaisena ulokkeena, koska putkisiltaa ei voitu kiinnittää sen välittömässä läheisyydessä olevaan seinään. Putkien huoltoa varten siltarakenteen yhteyteen suunniteltiin myös huoltotaso.



*KUVA 22. Putkisillan L-haaran uloke*

## 5.1 Laskentamallin luominen

Aluksi luotiin putkisillan matemaattinen laskentamalli Robot Structural Analysis –ohjelmistolla. Pilarit sijoitettiin rakennustehtäväpiirustuksen mukaisille paikoilleen. Sen jälkeen pilareiden päiden välille lisättiin tarvittavat solmupisteet horisontaali- ja diagonaalisauvojen lisäämistä varten. Pilarien jäykistyssauvojen mallinnuksen jälkeen luotiin yksi kannatinkehä, josta kopioitiin loput kehät halutuille etäisyyksille. Kehien väliin lisättiin parre- ja diagonaalisauvat sekä ristikoiden väliset tuulisiteet. Lopuksi mallinnettiin hoitotason kannatinrakenteet sekä ulokkeen diagonaalisauvat. Putkisillan valmiista laskentamallista muodostui kuvan 23 mukainen.



*KUVA 23. Laskentamallin geometria*

Kun laskentamallin geometria oli saatu valmiiksi, määriteltiin pilarien alapäihin jäykät tuet. Laskentamallin jäykän tuen vapausasteet vastasivat todenmukaisen pilarin ja perustuksen välistä pulttiliitosta. Mallinnuksen yhteydessä rakenneosille oli määritelty käytettävät profiilit sekä materiaaliominaisuudet. Laskentamallissa putkisillan rakenneosien teräslaatuina käytettiin S355:sta ja profiileina käytettiin seuraavia arvoja:

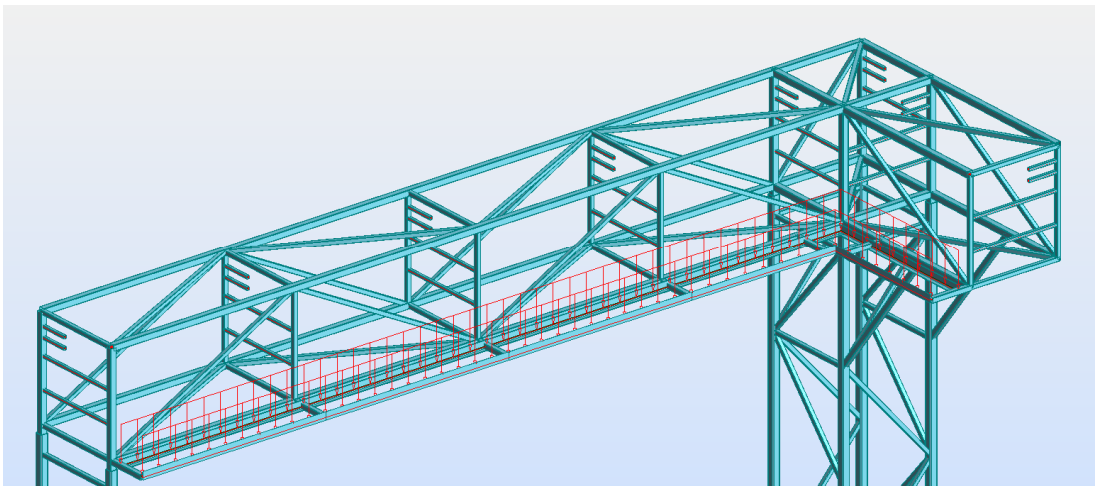
- pilarit: RHS 150x150x8
- ylä- ja alapaarteet: RHS 120x120x5

- uumasauvat: RHS 80x80x4
- putkien- ja kaapelihyllyjen kannatinorret: RHS 60x60x4
- hoitotason kannatinrakenteet: RHS 100x100x5, LN 150x90x10.

## 5.2 Laskentamallin kuormitukset

### 5.2.1 Rakenteiden omat painot

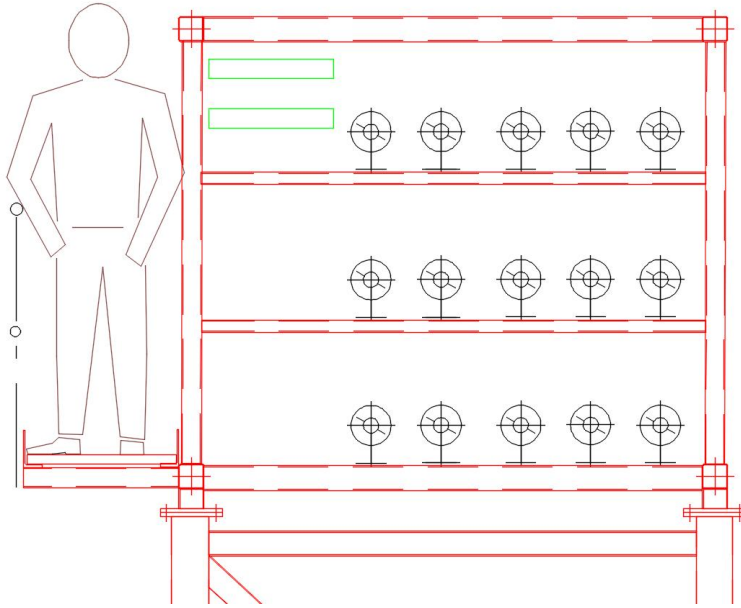
Robot Structural Analysis -ohjelmisto ottaa huomioon rakenteiden omat painot valittujen poikkileikkaustietojen mukaisesti, minkä vuoksi rakenneosien omia painoja ei tarvinnut syöttää erikseen laskentamalliin. Hoitotason kaiderakenteita ei mallinnettu laskentamalliin, minkä vuoksi niiden kuormat jouduttiin syöttämään erikseen. Kaiderakenteiden painoksi arvioitiin 0,1 kN/m. Kuvassa 24 esitetään hoitotason kaiderakenteiden kuormitukset.



KUVA 24. Hoitotason kaiteiden omat painot

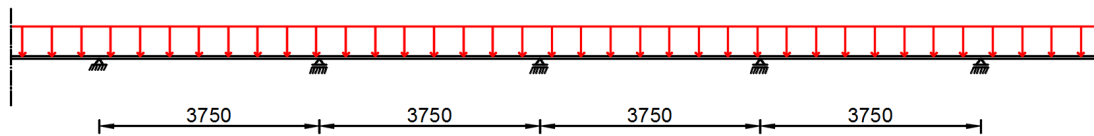
### 5.2.2 Putkiston ja kaapelihyllyjen kuormat

Putkisillalle oli tulossa käyttöönoton yhteydessä neljä DN50-putkea. Putkien myöhempää lisäystä varten putkisilta täytyi suunnitella siten, että sillä voitaisiin kantella yhteensä 15:tä DN50-putkea. Käytettävälle putkikoolle putkistosuunnittelija ilmoitti kuormaksi 0,1 kN/m putkea kohden ja putkien määritettiin jakautuvan tasan kaikille kolmelle kannatusorrelle kuvan 25 mukaan. Kaapelihyllyille ilmoitettiin käytettäväksi kuormaksi 0,5 kN/m hyllyä kohden.



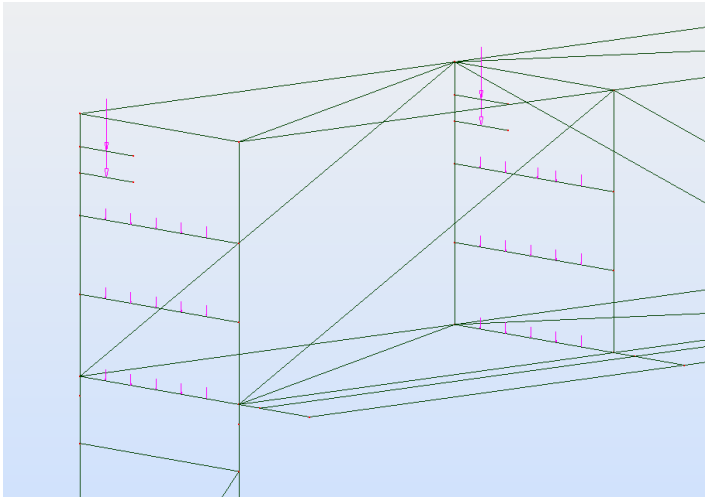
KUVA 25. Putkien sijoittelu kannatusorsille (Putkisilta 2015)

Putkien ja kaapelihyllyjen orsirakenteen suunniteltiin toteutettavaksi tasavälein kuvan 26 mukaisesti.



KUVA 26. Putken rakennemalli ja kannatusvälit

Putkien ja kaapelihyllyjen otaksuttiin toimivan putkisillan matkalla jatkuvina rakenteina, minkä vuoksi niiden orsirakenteille kohdistama kuorma laskettiin yhden tukivälin mittaiselta matkalta. Yhden putken orteen kohdistamaksi pistekuorman arvoksi saatiin 0,37 kN. Vastaavasti kaapelihyllyn orteen kohdistamaksi pistekuorman arvoksi saatiin 1,84 kN. Putkien ja kaapelihyllyjen kuormat sijoitettiin orsirakenteille kuvan 27 mukaisesti.

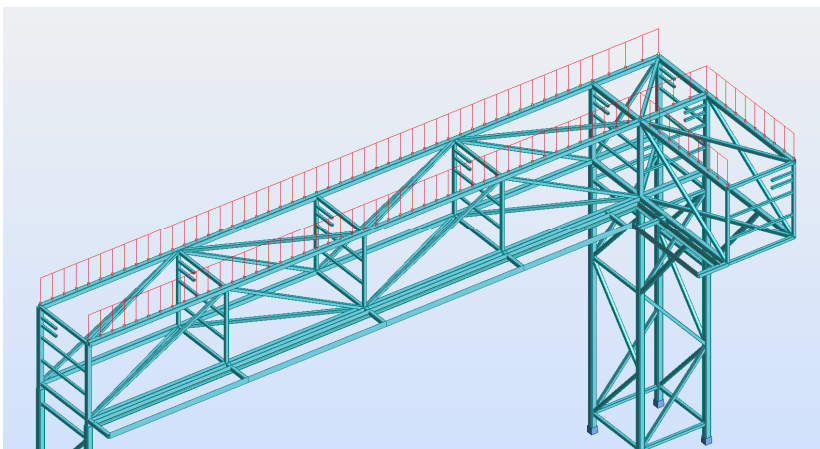


*KUVA 27. Putkien ja kaapelihyllyjen kuormat*

### **5.2.3 Lumikuorma**

Lumikuormat määritettiin katetun putkisillan (luvun 4.3.2) mukaan, koska rakenteen piti kestää jälkeensä tehtävän katon lumikuormat. Tarkasteltavan alueen maassa olevalle lumikuormalle määritettiin arvoksi  $2,0 \text{ kN/m}^2$ . Putkisillan katon muotokertoimeksi määritettiin  $0,8$ , koska kyseessä oli tasakatto. Katon lumikuorman ominaisarvoksi saatiin  $1,6 \text{ kN/m}^2$ .

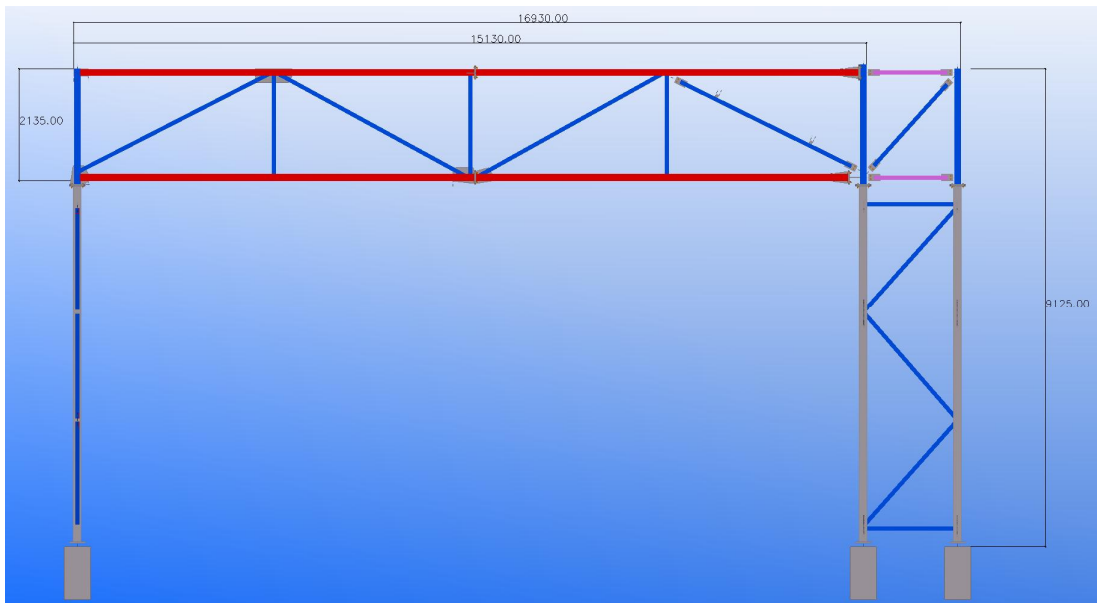
Teräsohutlevyn kannatus toteutettiin ristikkojen yläpaarteiden päältä, minkä vuoksi lumikuormat sijoitettiin laskentamalliin ainoastaan ristikkojen yläpaarteille. Lumen viivakuorman arvoksi saatiin  $1,44 \text{ kN/m}$ . Tilannetta havainnollistetaan kuvassa 28.



*KUVA 28. Lumikuorman sijoittaminen laskentamalliin*

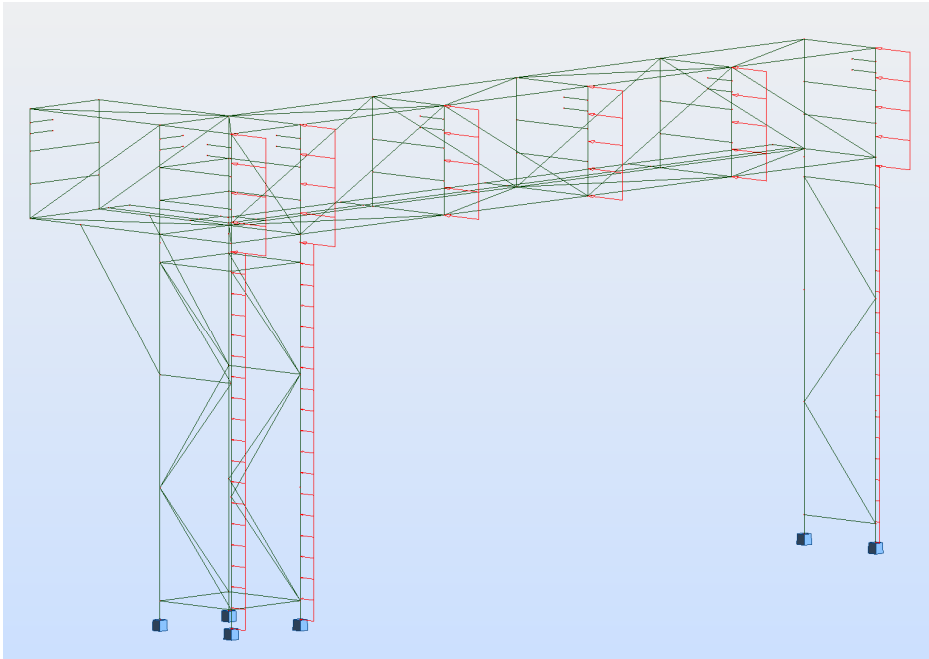
## 5.2.4 Tuulikuorma

Rakenteen tuulikuormien määrittämistä varten Mathcad 15 –matematiikkaohjelmaan tehtiin tämän opinnäytetyön luvun 4.4 mukainen laskentapohja. Laskentapohjaan määritettiin alueen maastoluokka, rakenteen korkeus sekä tuulen vaikutuksille alttiit pinta-alat. Laskentapohja laskee erinäisiä väliarvoja, joiden perusteella taulukoista määritettiin päätevaikutuksettoman tuulikuorman voimakertoimen arvo ja tehollinen hoikkuus. Tehollisen hoikkuuden ja eheysuhteen perusteella käyrästöltä saatiin ristikon päätevaikutuskertoimelle arvo. Lopputuloksena Mathcad 15 laskee tuulikuorman arvon. Tuulikuormien määrittämisessä hyödynnettiin siltarakenteesta Tekla Structures -mallinnusohjelmalla tehtyä 3D-mallia. 3D-mallista määritettiin tuulikuormalle alttiit rakenneosat sekä korkeusasema tuulenpaineen määrittämistä varten. Kuvasta 29 voidaan määrittää tuulikuorman projektiopinta-ala.



KUVA 29. Putkisillan sivuprofiili (Putkisilta 2015)

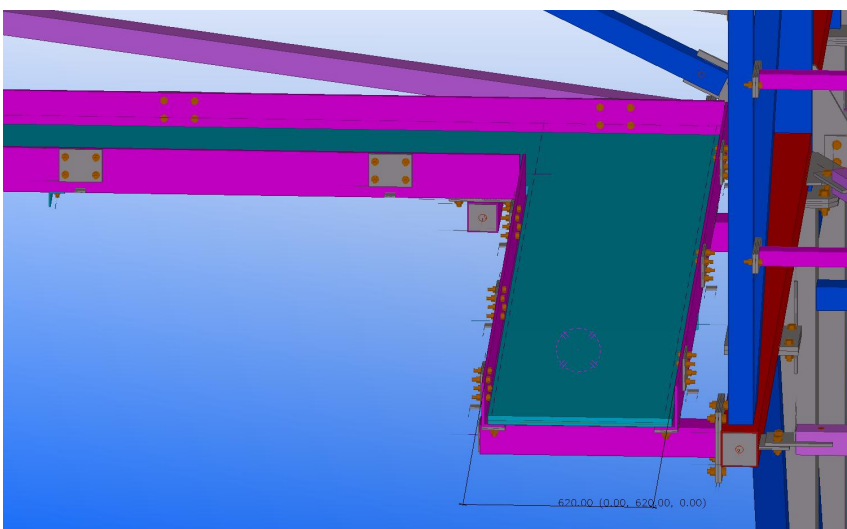
Tuulikuormat olisi voitu syöttää laskentamalliin myös sauvakohtaisesti, mutta ne päädyttiin keskittämään poikittaiskehille siten, että niiden vaikutus koko rakenteeseen on sama kuin, jos ne olisivat annettu jokaiselle sauvalle erikseen. Tuulikuormien kohdistusta havainnollistetaan kuvassa 30.



*KUVA 30. Tuulikuormien kohdistaminen*

### 5.2.5 Hoitotason kuormat

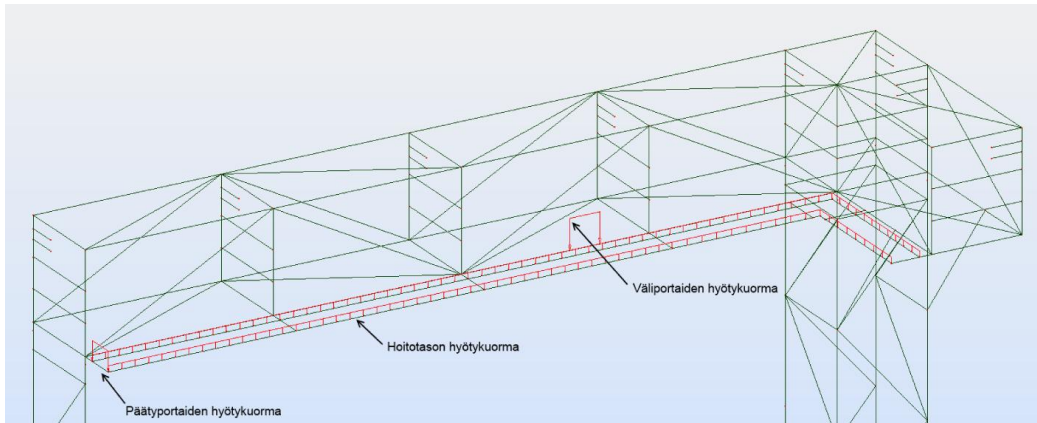
Hoitotason kuormana käytettiin pelkkää henkilökuormaa, jolle oli ilmoitettu arvoksi  $1,5 \text{ kN/m}^2$ . Tasoritilän ja kulmateräksen välinen liitos toteutettiin vapaasti tuettuna, minkä vuoksi tasoritilän päällä vaikuttava kuorma syötettiin laskentamalliin kulmaterästen päälle pelkkänä pystykuormana. Hoitotason tasoritilöiden kannatukseen käytettiin kuvan 31 mukaisia kulmateräksiä ja rakenneputkia.



*KUVA 31. Tasoritilän kannatus (Putkisilta 2015)*



Kulmaterästen päälle kohdistuva pystykuorma katsottiin kertyvän puolen tasoriti-  
län levyiseltä kaistalta, jolloin viivakuorman arvoksi saatiin 0,45 kN/m. Hoitotason  
portaiden hyötykuorman arvona käytettiin 1,50 kN/m. Kuvassa 32 esitetään hoi-  
totason ja portaiden hyötykuorman kohdistamista laskentamalliin.



KUVA 32. Hoitotason ja portaiden hyötykuormat

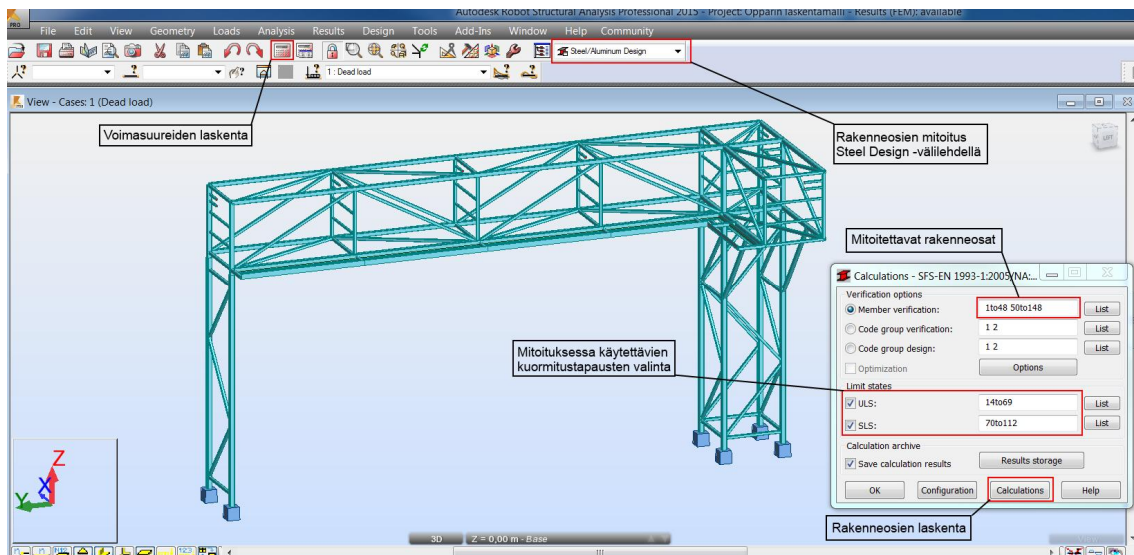
### 5.3 Kuormien yhdistely

Kun putkisillan laskentamalli oli valmiina, muodostettiin rakenteelle kuormitusyhdistelmiä rakenneosien mitoitus varten. Putkisillan seuraamusluokaksi määriteltiin CC2, minkä vuoksi kuormakertoimena  $K_{FI}$  käytettiin arvoa 1. Yhdistelykerroimina käytettiin Suomen kansallisen liitteen mukaisia yhdistelykertoimen arvoja.

Rakenteiden mitoitus varten muodostettiin lukuisia kuormitusyhdistelmiä, mutta tilan käytön vuoksi seuraavissa kappaleissa tarkastellaan ainoastaan määrääviä kuormitustapauksia.

### 5.4 Murtorajatilan tarkastelut

Putkisillan rakenneosien mitoitus tehtiin Robot Structural Analysis Professional 2015 -laskentaohjelmiston, Steel Design sovelluksella. Sovelluksen laskentakan-  
tana käytettiin SFS-EN 1993-1 sekä korjausliitteen ja Suomen kansallisen liitteen mukaisia arvoja. Kuvassa 33 esitetään rakenneosien laskentaan valitut sauvat sekä laskennassa käytettävät asetukset.



KUVA 33. Putkisillan rakenneosien mitoitus

Laskennan tuloksena saatiin rakenneosien käyttöasteet. Rakenteen käyttöasteet jäivät yleensä alhaiseksi, koska putkisillan määrääväksi tekijäksi muodostuvat sille asetetut taipumarajat tai liitosten kestävyudet. Kuvan 34 näkymästä luettiin sauvakohtaiset käyttöasteet ja määräävät kuormitustapaukset.

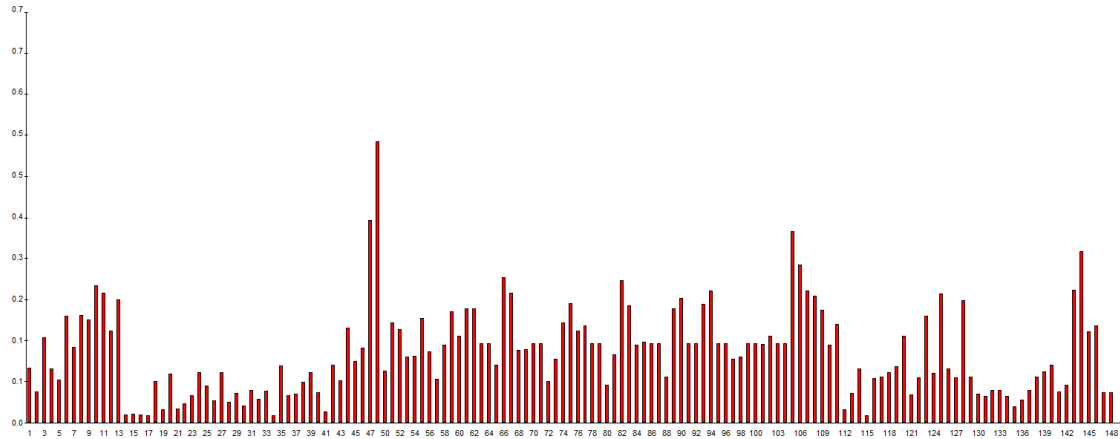
SFS-EN 1993-1:2005/NA:2007/AC:2009 - Member Verification ( ULS ) 1to48 50to148

Member	Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case
105 Beam 105	RRHS 100x100x5	S355NH	20.85	20.85	0.35	27 COMB14
144	RRHS 120x120x5	S355NH	80.59	80.59	0.32	44 COMB31
106 Bar 106	RRHS 100x100x5	S355NH	20.85	20.85	0.29	27 COMB14
66 Beam 66	RRHS 80x80x4	S355NH	64.93	64.93	0.27	26 COMB13
82 Beam 82	RRHS 80x80x4	S355NH	64.93	64.93	0.26	26 COMB13
10 Column 10	RRHS 120x120x5	S355NH	46.21	46.21	0.25	43 COMB30
143	RRHS 120x120x5	S355NH	80.59	80.59	0.25	43 COMB30
94 Beam 94	RRHS 60x60x4	S355NH	79.71	79.71	0.24	43 COMB30
107 Beam 107	RRHS 100x100x5	S355NH	20.85	20.85	0.24	27 COMB14
11 Column 11	RRHS 120x120x5	S355NH	46.21	46.21	0.24	45 COMB32
67 Beam 67	RRHS 80x80x4	S355NH	58.44	58.44	0.24	27 COMB14
125 Beam 125	RRHS 80x80x4	S355NH	137.98	137.98	0.24	43 COMB30
108 Beam 108	RRHS 100x100x5	S355NH	20.85	20.85	0.24	27 COMB14
90 Beam 90	RRHS 60x60x4	S355NH	79.71	79.71	0.23	43 COMB30
13 Column 13	RRHS 120x120x5	S355NH	46.21	46.21	0.23	29 COMB16
128 Beam 128	RRHS 80x80x4	S355NH	137.98	137.98	0.23	43 COMB30
75 Beam 75	RRHS 80x80x4	S355NH	58.44	58.44	0.22	27 COMB14
93 Beam 93	RRHS 60x60x4	S355NH	79.71	79.71	0.22	43 COMB30
83 Beam 83	RRHS 80x80x4	S355NH	58.44	58.44	0.22	27 COMB14
89 Beam 89	RRHS 60x60x4	S355NH	79.71	79.71	0.21	43 COMB30
62 Beam 62	RRHS 60x60x4	S355NH	79.71	79.71	0.21	59 COMB46
61 Beam 61	RRHS 60x60x4	S355NH	79.71	79.71	0.21	59 COMB46
109 Beam 109	RRHS 100x100x5	S355NH	20.85	20.85	0.21	43 COMB30
59 Beam 59	RRHS 80x80x4	S355NH	64.93	64.93	0.21	43 COMB30
8 Column 8	RRHS 120x120x5	S355NH	46.21	46.21	0.20	43 COMB30
6 Column 1.6	RRHS 150x150x8	S355NH	71.77	120.78	0.20	59 COMB46
123 Beam 123	RRHS 80x80x4	S355NH	137.98	137.98	0.20	38 COMB25

Calc. Note Close Help  
Ratio Analysis Map  
Calculation points  
Division: n = 10  
Extremes: none  
Additional: none

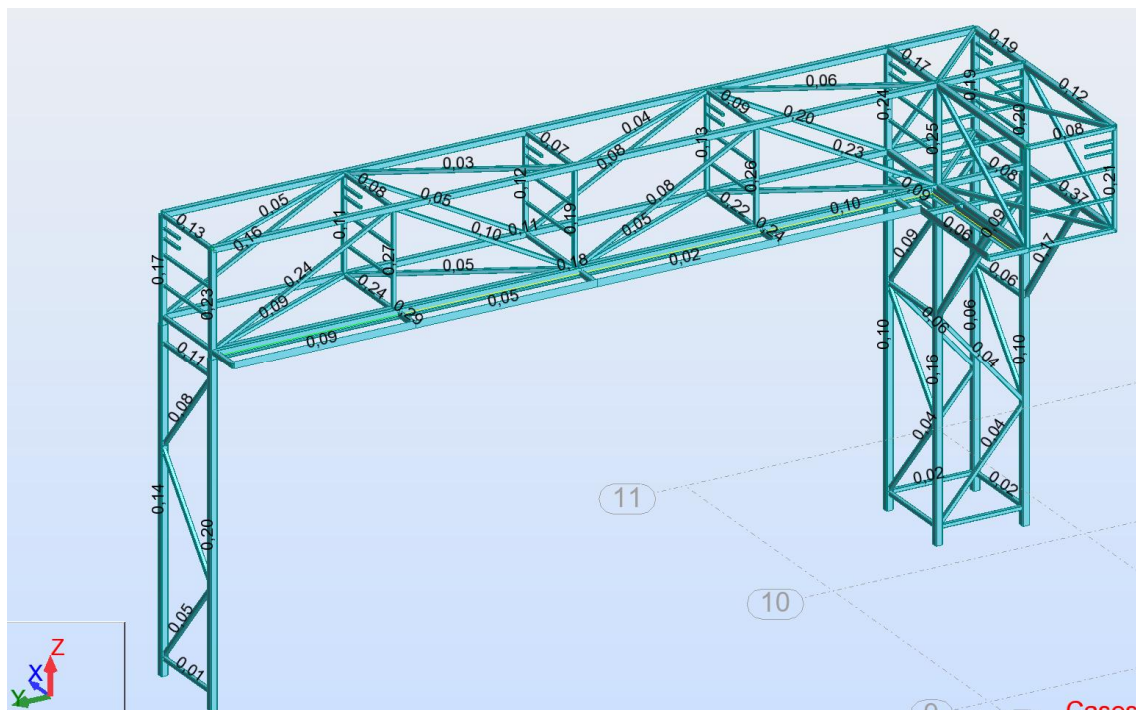
KUVA 34. Putkisillan rakenneosien laskentatulokset

Putkisillan laskentatuloksia voidaan tarkastella myös vaihtoehdoissa muodoissa. Kuvan 34 näkymässä esiintyvän Analysis-painikkeen takaa saadaan sauvojen käyttöasteet kuvan 35 mukaisesti diagrammimuotoisena.



KUVA 35. Putkisillan rakenneosien käyttöasteet diagrammin muodossa

Vastaavasti tuloksia voidaan tarkastella myös 3D-mallin avulla. Sauvojen murto-rajatilan käyttöasteet saadaan esitettyä kuvan 34 näkymässä esiintyvän Map-painikkeen takaa. Rakenneosittaiset käyttöasteet esitetään kuvassa 36.



KUVA 36. Putkisillan rakenneosien käyttöasteet 3D-mallissa

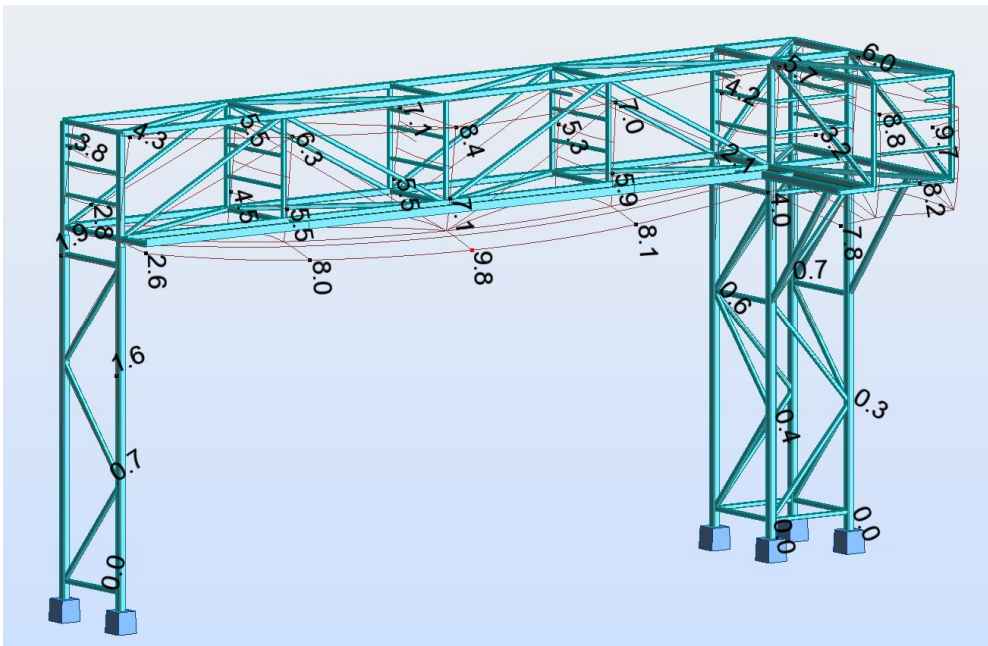
Kuvien 34 – 36 käyttöasteiden perusteella pääteltiin, että rakenneosien mekaaniset kestävyudet olivat riittävät.

## 5.5 Käyttörajan tarkastelut

Tässä luvussa 5.5 esitetyt kuvat havainnollistavat rakenteen resultoivia siirtymiä ja niiden suuruuksia. Tekstiosissa esitetyt siirtymien arvot ovat joko pysty- tai vaakasiirtymän arvoja, jotka on haettu erikseen laskentaohjelman siirtymätaulukosta. Laskentaohjelman siirtymien kuvantamistavan vuoksi kuvien ja tekstiosien lukuarvot eivät täysin vastaa toisiaan. Siirtymätaulukoita ei ole tässä yhteydessä erikseen tarkastella.

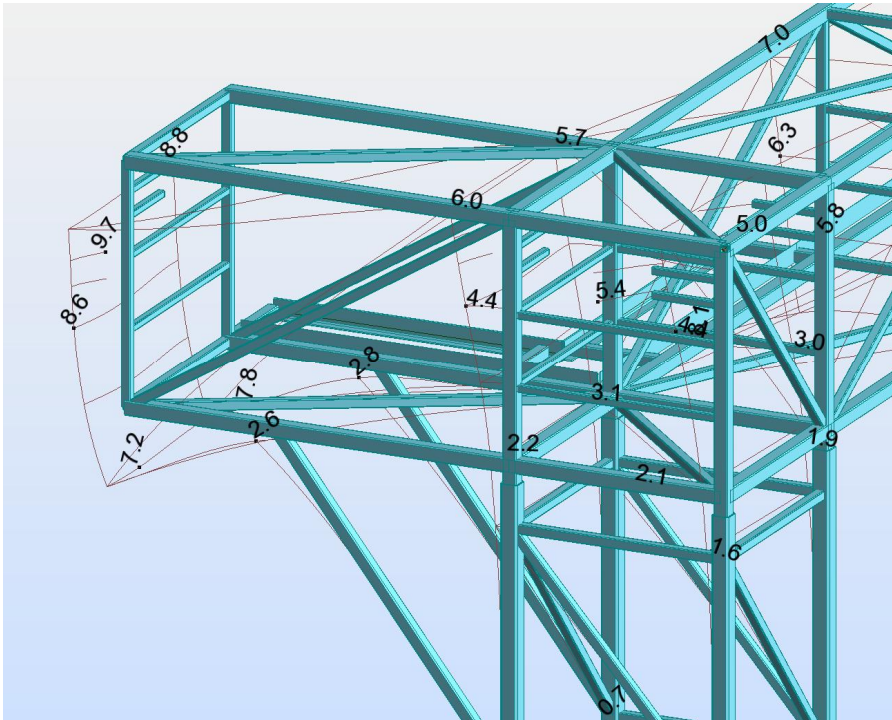
### Rakenteen pysty- ja vaakasiirtymät

Putkisillan taipumat tarkistettiin käyttörajan mukaan. Kuvassa 37 on esitetty putkisillan resultoivat siirtymät. Siltalohkon suurimmaksi taipumaksi saatiin 6,6 mm, mikä jäi alle sille sallitun taipumarajan  $L/600$ . Hoitotason kannatinorren ulokapään suurimmaksi taipuman arvoksi saatiin 9,8 mm. Suhteellisen taipuman ollessa kuitenkin vain 2,7 mm voitiin todeta taipuman alittavan sille sallitun taipumarajan  $L/200$ .



KUVA 37. Putkisillan resultoivat siirtymät

Ulokkeen suurimmaksi taipuman arvoksi saatiin 6,5 mm, mikä alle jäi sille sallitun rajan. Kuvassa 38 on esitetty L-haaran ulokkeen rezultoivat siirtymät.



*KUVA 38. Putkisillan ulokkeen rezultoivat siirtymät*

Suurimmaksi vaakasiirtymän arvoksi saatiin putkisillan poikittaissuunnassa 3,0 mm ja pitkittäissuunnassa 5,8 mm. Vaakasiirtymien arvojen todettiin alittavan niille sallittavan rajan  $H/400$ .

## 6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä putkisiltojen suunnittelu- ja mitoituskäytäntöihin olemassa olevien ohjeiden, määräysten sekä kokemusperäisen tiedon perusteella. Tavoitteena oli myös koota lyhyt ohjeistus putkisiltojen luonnonkuormien ja niiden yhdistelmien määrittämiseksi. Putkistoa kannattelevan siltarakenteen mitoitusta pyrittiin havainnollistamaan esimerkkikohteen laskentamallin avulla. Aiheen laajuuden rajaamiseksi työn pääpainona pidettiin luonnonkuormien laskentaa ja niiden vaikutusten tarkastelua laskentamallin avulla.

Insinööriyön lopputuloksena saatiin laadittua Sweco Rakennetekniikka Oy:lle yksinkertainen ohjeistus, jonka pohjalta rakennesuunnittelija voi määrittää putkisiltoihin kohdistuvat tuuli-, lumi- ja jääkuormat. Lisäksi työssä saatiin luotua laskentapohja, jota voidaan hyödyntää sauvamaisten rakenteiden tuulikuormien laskennassa. Putkisillan suunnittelua ja mitoitusta onnistuttiin havainnollistamaan esimerkkikohteesta tehdyn 3D-mallin sekä laskentamallin avulla.

Insinööriyö aloitettiin perehtymällä Rakennusinsinöörien liiton (RIL) eurokoodia käsitteleviin teoksiin. Putkisiltojen geometrisen erikoispiirteisyyden vuoksi eurokoodin mukaisesta RIL 201-1-2011 -teoksesta ei kuitenkaan löytynyt ohjeistusta rakenteiden kuormien määrittämiseksi. Rakentamismääräyskokoelman B1 mukaisesta RIL 144–2002: Rakenteiden kuormitusohjeet -teoksesta sen sijaan löytyi ohjeistus aukollisten rakenteiden tuulikuormien määrittämiseksi, mutta ohjeen käyttö ei soveltunut käytettäväksi yhdessä eurokoodin kanssa. Sen vuoksi sauvamaisten rakenteiden tuulikuormia jouduttiin selvittämään standardista SFS-EN 1991-1-4.

Siltarakenteiden lumikuormien määrittämiseksi ei löytynyt soveltuvaa ohjeistusta standardista SFS-EN 1991-1-3. Putkisillan lumikuormien laskentaa oli kuitenkin käsitelty Marko Kestin tekemässä diplomityössä sekä Richard M. Draken ja Robert J. Walterin Design of Structural Steel Pipe Racks -tiedeartikkelissa. Niissä esitettyjen mukaan putkisiltojen lumikuormia voitaisiin pitää toisinaan merkityk-

settömän pieninä. Putkisilloissa, joissa putket on aseteltu tiiviisti vierekkäin, lumikuormat tulisi kuitenkin ottaa huomioon. Tällöin lumikuorman määrää voitaisiin arvioida kattorakenteiden mukaisesti tai käyttää katoilla käytettävää minimi lumikuormaa. Kyseistä tapaa voitaneen käyttää vielä nykyaikanakin, mutta eurokoodin mukaisilla lumikuorman arvoilla.

Suomen normeissa ei ole määrätty jääkuormia käytettäväksi muiden kuin piippu- ja mastorakenteiden suunnittelussa. Kansainvälinen ISO 12494:2001 -standardi kuitenkin suosittelee jääkuormia käytettävän myös avoimilla rakenteilla. Siksi tässä insinööriyössä esitettiin yksi jääkuormien arviointitapa, jossa sovellettiin Suomen mastojen ja ISO 12494:2001 -standardin mukaista määrittäytapaa.

Opinnäytetyön aiheen rajaaminen oli haasteellista, sillä putkisiltojen suunnittelu on laaja ja monialainen kokonaisuus. Osa putkisiltoihin kohdistuvasta selvitystyöstä rajattiin tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Työn teoriaosan kirjoittaminen koettiin myös haasteelliseksi, koska kuormien määrittämiseksi ei löydetty tiivistettyjä ohjeistuksia, vaan jouduttiin perehtymään syvällisesti eurokoodin alkupe- räisiin standardeihin. Vastaavasti työn käsittelyosuus oli helpompi, koska teoria- asioihin oli perehdytty perusteellisesti. Tuulikuorman laskentapohjan teossa haasteellisinta oli saada se laskemaan mahdollisimman vähillä syötettävillä arvoilla.

Insinööriyössä tehdyn tuulikuorman laskentapohjalla voidaan määrittää aukolli- siin rakenteisiin kohdistuvat tuulikuormat. Sen käyttöä varten joudutaan määrittä- mään rakenteen tuulen vaikutukselle alttiiden rakenne-osien pinta-aloja, mikä te- kee sen käytöstä kuitenkin työlästä. Lisäksi laskentapohjassa joudutaan määrit- telemään saatujen väliarvojen perusteella taulukkojen mukaisia parametreja lo- pullisen tuulikuorman määrittämiseksi. Laskentapohjan testikäytön pohjalta voi- daan todeta, että laskentapohja toimii. Laskentapohjaa käyttäessä on myös hyvä huomata, että käytettävien pinta-alojen erityisen tarkalla määrittämisellä ei ole lopputuloksen kannalta suurta vaikutusta. Sen vuoksi esimerkiksi ristikkosauvo- jen liitososien pinta-alojen tarkka määrittäminen ei ole tarkoituksenmukaista.

## LÄHTEET

Bendapudi, Kasi V. 2010. Structural Design of Steel Pipe Support Structures. STRUCTURE magazine. February 2010. Saatavissa: <http://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2014/08/C-StructDesign-Bendapudi-Feb101.pdf>. Hakupäivä 6.2.2016.

Derry, Markus 2016. Sweco Rakennetekniikka Oy. Re: Kysymyksiä putkisilta pinnäytetyöhön. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Sami Hannila. 16.1.2016.

Drake, Richard M. – Walter, Robert J. 2010. Design of Structural Steel Pipe Racks. Engineering Journal. Fourth Quarter, 2010. Saatavissa: [http://www.sefindia.org/forum/files/design\\_of\\_structural\\_steel\\_pipe\\_racks\\_115.pdf](http://www.sefindia.org/forum/files/design_of_structural_steel_pipe_racks_115.pdf). Hakupäivä 6.2.2016.

ISO 12494:2001. 2001. Atmospheric icing of structures. Geneve: International Organization for Standardization.

Jaakkosela, Jussi 2014. Putkisillan lämpöliikkeiden aiheuttamien voimien määrittäminen siltalohkojen liitoksille ja kiintopisteille. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, tuotantotalouden ja rakentamisen tiedekunta.

Joronen, Olli 2012. Putkiston kannatus. Helsinki: Sweco Industry Oy.

Kannakointi. Roof Top Box. Saatavissa: <http://roofpipingblock.com/089-2-blox-2-tier-bridge-piping-rack-wsbc-07.html>. Hakupäivä 6.2.2016.

Kesti, Marko 1991. Putkisiltojen suunnitteluohjeet ja -järjestelmä. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto, konetekniikan osasto.

Kesti, Marko 1992. Teollisuusputkistot. Helsinki: Opetushallitus.

Kiintopistekannake. Sejotek Oy. Saatavissa: [http://www.rakennusfakta.fi/14/pdcnewsitem/01/48/92/index\\_14.html](http://www.rakennusfakta.fi/14/pdcnewsitem/01/48/92/index_14.html). Hakupäivä 6.2.2016.



Liukukannake. 2015. PSK Standardisointi. Saatavissa: <http://www.psk-standardisointi.fi/Alasivut/Tiedotteet/Tiedotteet/TIED0315.pdf>. Hakupäivä 6.2.2016.

Makkonen, Lasse 2011. Rakentajain kalenteri 2011. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy, Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry.

PSK 7302. 2014. Putkiston kannatus. Kannakestandardien käyttö. Helsinki: PSK Standardointi.

PSK 7304. 2014. Putkiston kannatus. Teräsputket. Suositeltavat kannatusvälit. Helsinki: PSK Standardointi.

Putkisilta 2015. Sisäinen dokumentti. Sweco Rakennetekniikka Oy.

Putkistojen jännitysanalyysi. 2005. Sisäinen ohjemateriaali. Sweco PIC Oy.

Riippukannake. 2012. Hilti Oy. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41138/Mannisto\\_Joonas.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41138/Mannisto_Joonas.pdf?sequence=1). Hakupäivä 6.2.2016.

RIL 201-1-2011. 2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Ristikkorakenteinen putkisilta 2016. Sisäinen dokumentti. Sweco Rakennetekniikka Oy.

SFS-EN 1991-1-1 + AC. 2002. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1991-1-4 NA. 2010. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4. Helsinki: Suomen ympäristöministeriö.

SFS-EN 1991-1-7. 2014. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitoksen mitoitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-3-1 + AC. 2010. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 3-1: Mastot ja savupiiput. Mastot. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-3-1 NA. 2010 . Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-3-1. Helsinki: Suomen ympäristöministeriö.

SFS-ENV 1993-3-1 NA. 2000. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 3-1: Mastot ja savupiiput. Mastot. Liite NA: Kansallinen soveltamisasiakirja (velvoittava). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 14122-2 + A1. 2010. Koneturvallisuus. Koneiden kiinteät kulkutiet. Osa 2: Työskentelytasot ja kulkutasot. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS 4965. 1993. Rakennustehtäväpiirustus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.